

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт ИНК

Направление подготовки 12.04.01 «Приборостроение»

Кафедра ФМПК

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Разработка рентгеновского абсорбционного измерителя плотности материалов объектов контроля сложной формы</b>

УДК 620.179.152:531.75

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Абашкин Антон Дмитриевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
в.н.с. лаборатории № 40 ИНК ТПУ	Осипов С.П.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав.каф. менеджмента	Чистякова Н.О.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Анищенко Ю.В.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФМПК	Суржиков А.П.	профессор, д.ф.-м.н.		

Томск – 2016 г.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт ИНК  
Направление подготовки (специальность) 12.04.01 «Приборостроение»  
Кафедра ФМПК

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ4А	Абашкину А.Д.

Тема работы:

**Разработка рентгеновского абсорбционного измерителя плотности материалов объектов контроля сложной формы**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№2655/с от 27.04.2015г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

Предмет диссертационных исследований – абсорбционные рентгеновские методы измерения плотности. Объект исследований – закономерности формирования и алгоритмы обработки цифровых радиометрических сигналов применительно к оценке плотности материалов крупногабаритных объектов сложной формы. Цель исследований – разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса рентгеновского абсорбционного измерителя плотности.

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Разработать математическую модель рентгеновского абсорбционного измерителя плотности материала для объектов контроля сложной формы.  2. Разработать высокоточную аппроксимацию массового коэффициента ослабления рентгеновского излучения.  3. Разработать и экспериментально проверить алгоритм обработки информации для многоканального измерителя плотности крупногабаритных объектов.
<b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Рисунки, схемы, графики

### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
<b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>	<b>Чистякова Н.О.</b>
<b>Социальная ответственность</b>	<b>Анищенко Ю.В.</b>

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

**Введение, Обзор литературы, Раздел 2.5, Раздел 3.1**

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	10.09.14
---	----------

### Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. лаборатории № 40 ИНК	Осипов С.П.	К.т.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Абашкин А.Д.		

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ4А	Абашкину Антону дмитриевичу

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, периодических изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Предпроектный анализ	- Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения; - FAST анализ - SWOT-анализ;
2. Инициация проекта	- Цели и результат проекта; - Организационная структура проекта
3. Планирование управления научно-техническим проектом	- План проекта; - Диаграмма Ганта
4. Бюджет научного исследования	- Сырье, материалы, покупные изделия - Специальное оборудование для экспериментальных работ; - Расчет основной и дополнительной заработной платы, отчислений на социальные нужды и накладные расходы
5. Реестр рисков проекта	- Таблица рисков

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Функционально-стоимостная диаграмма
3. Матрица SWOT
4. Диаграмма Ганта
5. Бюджет НИ
6. Таблица рисков

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

## Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой менеджмента	Чистякова Наталья Олеговна	к. э. н., доцент		

## Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Абашкин Антон Дмитриевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ4А	Абашкину Антону Дмитриевичу

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Разработка рентгеновского абсорбционного измерителя плотности материалов объектов контроля сложной формы</i>
--	---

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности.	1.1 Влияние электромагнитных и радиочастотных излучений; повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне; недостаточная освещенность рабочей зоны; отклонения показателей микроклимата от нормальных; влияние шума и вибрации. 1.2 Электрический ток;
<b>2. Экологическая безопасность.</b>	Воздействие на литосферу. Работа с производственными отходами, переработка.
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Вероятные ЧС: Разрушение здания; пожары. Меры безопасности.
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	Технические и организационные мероприятия по компоновке рабочей зоны

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Анищенко Ю. В.	к.т.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Абашкин Антон Дмитриевич		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 120 с., 11 рис., 27 табл., 67 источников, 3 прил.

Ключевые слова: плотность; массовая толщина; высокоэнергетическое рентгеновское излучение; ужесточение рентгеновского излучения; полиномиальная аппроксимация; рассеянное излучение.

Объектом исследования являются: закономерности формирования и алгоритмы обработки цифровых радиометрических сигналов применительно к оценке плотности материалов крупногабаритных объектов сложной формы.

Цель работы – разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса рентгеновского абсорбционного измерителя плотности.

В процессе исследования проводились теоретические и экспериментальные работы, связанные с разработкой методик выбора и оценки параметров и характеристик комплексов высокоэнергетического рентгеновского измерителя плотности.

В результате исследования реализованы математическая модель, уравнение измерителя, алгоритмы выбора и оценки параметров и характеристик рентгеновского абсорбционного измерителя плотности крупногабаритных объектов сложной формы.

Степень внедрения: результаты исследований реализованы в виде рекомендаций, алгоритмов по выбору и оценке параметров абсорбционного измерителя плотности крупногабаритных объектов сложной формы.

Область применения: измерение плотности крупногабаритных объектов (до 240 мм по стали) промышленного назначения.

Экономическая эффективность/значимость работы состоит в теоретическом и экспериментальном обосновании возможности разработки рентгеновского абсорбционного измерителя плотности материалов крупногабаритных объектов сложной формы.

В будущем планируется доработка методик выбора и оценки параметров рентгеновского абсорбционного измерителя плотности материалов крупногабаритных объектов сложной формы и внедрение их в промышленности.

## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
2. ГОСТ Р 22.0.01-94 Безопасность в ЧС. Основные положения.
3. ГОСТ Р 22.0.07-95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**абсорбция:** Физический процесс поглощения фотонов веществом.

**аппроксимация:** Способ описания экспериментальных или теоретических зависимостей более простыми аналитическими зависимостями с минимально возможным количеством параметров.

**бетатрон:** Циклический ускоритель электронов с фиксированной равновесной орбитой, ускорение в котором происходит с помощью вихревого электрического поля.

**ионизирующее излучение:** Потоки фотонов, элементарных частиц или осколков деления атомов, способных ионизировать вещество.

Сокращения русских слов выполняются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.12-2011, сокращения иностранных слов – в соответствии с ГОСТ 7.11-2004. Также в данной работе приведены следующие сокращения:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

МДЭ – метод дуальных энергий;

ОК – объект контроля;

САПР – система автоматического проектирования.

<b>Оглавление</b>	
<b>Введение</b>	<b>9</b>
<b>1. Обзор литературы</b>	<b>13</b>
<b>2. Особенности рентгеновской абсорбционной плотнометрии крупногабаритных объектов с переменной толщиной</b>	<b>23</b>
2.1 Формирование, оцифровка и калибровка измерительных сигналов	24
2.2 Уравнение рентгеновского абсорбционного измерителя плотности	26
2.3 Расчёт зависимости $P(\rho H)$ . Формула для расчёта лучевой толщины объекта контроля	27
2.4 Выбор разрядности АЦП	28
2.5 Пример расчета $Y(\rho H)$	29
2.6 Исследование приближений функции $P^{-1}(Y)$ полиномами	31
2.7 Экспериментальные исследования	33
<b>3. Оценка возможности измерения плотности материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий</b>	<b>37</b>
3.1 Общие сведения о методе дуальных энергий	37
3.2 Формирование цифровых теневых радиографических изображений	38
3.3 Получение цифровых изображений метода дуальных энергий	42
3.4 Алгоритм калибровки	49
<b>4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>	<b>58</b>
4.1 Предпроектный анализ	58
4.2 SWOT-анализ	64
4.3 Инициация проекта	67
4.4 Планирование управления научно-техническим проектом	68
4.5 Бюджет научного исследования	73
4.6 Реестр рисков проекта	79
<b>5. Социальная ответственность</b>	<b>80</b>
5.1 Производственная безопасность	80
5.2 Экологическая безопасность	85
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	86
5.4 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	88
<b>Список публикаций студента</b>	<b>92</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>94</b>
<b>Приложение 1. Календарный план-график проведения НИОКР</b>	<b>100</b>
<b>Приложение 2. Реестр рисков по проекту</b>	<b>103</b>
<b>Приложение 3. Английский язык</b>	<b>104</b>



## Введение

Одной из наиболее важных характеристик материалов является плотность. В настоящее время наблюдается всплеск интереса и ученых и производителей к задачам, связанным с измерением плотности. Это обусловлено значительным прогрессом в производстве материалов различного назначения, а также расширением выпуска разнообразных изделий сложной формы и большого размера. Потребителей интересует, как правило, информация не о средней плотности по всему объему испытываемого объекта, а о распределении плотности по фрагментам объекта контроля. Вышесказанное обуславливает **актуальность темы** диссертационных исследований. Радиационные методы, основанные на регистрации проходящего или рассеянного излучения, достаточно широко используются для измерения плотности. В качестве источников ионизирующего излучения применяют источники гамма-излучения либо рентгеновские аппараты. Ограничением для оценки плотности материалов крупногабаритных объектов с переменной толщиной является максимальная энергия источников рентгеновского и гамма-излучения. Из выпускаемых серийно источников гамма-излучения с высокой удельной активностью следует отметить радионуклид  $\text{Co-60}$  со средней энергией 1,25 МэВ. В настоящее время наблюдается прогресс в повышении максимальной энергии рентгеновских аппаратов, которая достигла уровня 850 кэВ. Несмотря на упомянутый прогресс, рентгеновские аппараты с максимальной энергией, превышающей 450 кэВ, редки в промышленных применениях, что обуславливается, прежде всего, их предельно высокой стоимостью. Альтернативой упомянутым рентгеновским аппаратам выступают уникальные источники высокоэнергетического рентгеновского излучения – малогабаритные импульсные бетатроны, производимые малыми сериями Томским политехническим университетом. Отличительной особенностью этих бетатронов является высокая максимальная энергия рентгеновского излучения – от 2 МэВ до 9 МэВ и достаточно высокая стабильность параметров рентгеновского излучения от импульса к импульсу. Еще одним важным

фактором в пользу выбора в качестве источников рентгеновского излучения бетатронов ТПУ выступает очень высокий уровень проникающей способности. В документации на бетатроны МИБ-7,5, МИБ-9 указано значение проникающей способности на уровне 240–300 мм по стали. Следует отметить, что результаты уникальных экспериментов, проведенных на досмотровом комплексе ТПУ, существенно расширили области возможного применения бетатронов, так как была достигнута проникающая способность 400–430 мм по стали. Существует еще один фактор, способствующий решению сформулированной выше задачи. Этот фактор связан с заметным прогрессом в разработке высокоэффективных линейных и матричных детекторов рентгеновского излучения.

***Предмет диссертационных исследований*** – абсорбционные рентгеновские методы измерения плотности.

***Объект исследований*** – закономерности формирования и алгоритмы обработки цифровых радиометрических сигналов применительно к оценке плотности материалов крупногабаритных объектов сложной формы.

***Цель исследований*** – разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса рентгеновского абсорбционного измерителя плотности.

***Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач, связанных с разработкой:***

- математической модели рентгеновского абсорбционного измерителя плотности материала применительно к контролю объектов сложной формы;
- высокоточной аппроксимации массового коэффициента ослабления рентгеновского излучения от толщины ослабляющего барьера;
- алгоритма обработки информации для многоканального измерителя плотности крупногабаритных объектов.

***Методы исследования.*** Для решения поставленных задач использовались методы математического анализа, математического и

натурного моделирования, статистической обработки результатов экспериментальных исследований.

***Научная новизна:***

- Разработана математическая модель рентгеновского абсорбционного измерителя плотности материала применительно к контролю объектов сложной формы.
- Предложена высокоточная аппроксимация массового коэффициента ослабления рентгеновского излучения от толщины ослабляющего барьера.
- Разработан алгоритм обработки информации для многоканального измерителя плотности крупногабаритных объектов.
- Проведена экспериментальная оценка предельных возможностей рентгеновского абсорбционного метода измерения плотности применительно к испытанию крупногабаритных объектов сложной формы.

***Практическая значимость работы*** состоит в том, что полученные в процессе диссертационных исследований результаты позволят разработать рентгеновский абсорбционный измеритель плотности материалов крупногабаритных объектов сложной формы.

***Реализация результатов работы.*** Результаты выполненных исследований реализованы в математической модели, в уравнении измерителя и в алгоритмах выбора и оценки параметров и характеристик рентгеновского абсорбционного измерителя плотности крупногабаритных объектов сложной формы.

***Апробация работы.*** Основные положения диссертационной работы обсуждались на XIX Всероссийской научно-практической конференции «Качество – стратегия XXI века» (Томск 2014), на VI Всероссийской конференции «Ресурсоэффективными технологиями – энергию и энтузиазм молодых» (Томск 2015), на XX Всероссийской научно-технической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы» (Барнаул 2015), на IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых

ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск 2015).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 4 печатных работах, причем две из них опубликованы в журналах, реферируемых в SCOPUS и WEBofScience.

**На защиту выносятся:**

- Математическая модель рентгеновского абсорбционного измерителя плотности материала применительно к контролю объектов сложной формы.
- Высокоточная аппроксимация массового коэффициента ослабления рентгеновского излучения от толщины ослабляющего барьера.
- Алгоритм обработки информации для многоканального измерителя плотности крупногабаритных объектов.
- Результаты экспериментальной оценки предельных возможностей измерения плотности методом высокоэнергетической цифровой радиографии.

## 1. Обзор литературы

Среди большого числа показателей качества материалов плотность занимает особое место, так как она во многом определяет такие характеристики, как прочность, долговечность, непроницаемость, морозостойкость и другие [1]. В промышленном и гражданском строительстве важнейшим контролируемым параметром является коэффициент уплотнения. Изменение данного коэффициента на 1 % вызывает изменение прочности до 8 – 10 % уже при коэффициенте уплотнения 0,95 – 0,96. Решение некоторых инженерно – строительных и инженерно – геологических задач невозможно без знания плотности материала. Плотностные измерения получили широкое распространение в различных и широких отраслях промышленности.

Одна из основных физических величин, которые характеризуют свойства твердых веществ – это плотность. Ее измерение играет очень большую роль при проведении исследовательских работ, которые имеют место быть в разных отраслях науки и техники. Также измерение плотности является важной частью при осуществлении контроля за качеством продукции и технологическими процессами. Во многих отраслях промышленности, таких как химическая, металлургическая, нефтяная, и других, приборы для измерения плотности являются важным элементом комплексной автоматизации [2].

Большое внимание в наши дни уделяется расширению промышленного производства уже существующих типов плотномеров. Но еще больше средств и ресурсов выделяется на исследование и разработку новых принципов измерения плотности и создание конструктивно новых устройств для измерения плотности объектов. Предпосылкой к росту роли и значения измерения плотности стало увеличение номенклатуры производств и технологических процессов, в которых расход участвующих в осуществлении процессов веществ оценивается по массе. В таких методах массовый расход определяется путем умножения между собой результатов отдельных измерений плотности. В организации различных систем количественного учета (где измеряемым параметром является масса) веществ велика роль измерения

плотности, поскольку не всегда представляется возможным определить вес объекта или тела непосредственным взвешиванием. В таких случаях по результатам измерения плотности и объема объекта можно определить его вес.

В статьях [3] и [4] показано, что измерение плотности играет важную роль при создании различных измерительных средств (отрасли приборостроения и метрологии), которые связаны с анализом состава вещества и его свойств. В развивающихся отраслях науки, являющимися относительно новыми, определение плотности веществ занимает высокую значимость. Это такие исследования, как космические [5], исследование плазмы [6], так же в данную группу можно включить разнообразные исследования, связанные с решением проблем окружающей среды.

Различают различные методы измерения плотности твердых тел – далее рассмотрены наиболее популярные из них.

Принцип гидростатического взвешивания. Данный принцип основан на использовании закона Архимеда. Так как выталкивающая сила, действующая на погруженное в жидкость тело, пропорциональна плотности жидкости, то, взвесив тело в жидкости можно найти массу жидкости в этом теле, а, следовательно, и плотность. Для того, чтобы измерить плотность твердого тела данным методом, тело взвешивают сначала в воздухе, а потом в жидкости известной плотности. По результатам данных измерений можно судить о массе и объеме тела, что является основой для измерения плотности [7]. Для того, чтобы определить плотность тела при определенной температуре, нужно нагреть жидкость, в которой производится взвешивание. В принципе можно взвешивать тело в жидкости любой температуры, отличающейся от заданной для определения плотности (например, при температуре помещения, что весьма удобно), но в этом случае должен быть известен коэффициент теплового расширения исследуемого вещества, чтобы позволило бы учесть соответствующее изменение объема [8].

Измерение плотности при помощи пикнометра является наиболее точным, но в то же время – это трудоемкий метод. Пикнометр представляет

собой сосуд определенного объема и формы. Данный метод основан на взвешивании вещества, которое занимает в пикнометре известный объем. Пикнометрический метод имеет ряд преимуществ относительно метода гидростатического взвешивания. Основные достоинства метода: малая погрешность измерений, что обусловлено применением высокоточных лабораторных весов без каких-либо дополнительных устройств, которые уменьшают чувствительность; свободная поверхность в пикнометре имеет маленькую площадь, что практически исключает испарение жидкости, а также уменьшает поглощение из воздуха влаги; операции термостатирования жидкости в пикнометре и взвешивание объекта проводятся отдельно друг от друга. Данный метод имеет и свои недостатки: во всем объеме жидкости трудно поддерживать постоянную температуру; при взвешивании большой массы наблюдается снижение чувствительности весов. Поэтому при точных измерениях, когда вполне оправданы некоторая трудоемкость и необходимость соблюдения ряда предосторожностей, пикнометрическому методу по сравнению с гидростатическим взвешиванием отдают предпочтение [8]. Согласно [2], при пикнометрическом методе измерения плотности твердых тел выполняют 3 взвешивания: испытуемого тела в воздухе; пикнометра, наполненного жидкостью известной плотности; пикнометра, наполненного той же жидкостью и с погруженным в нее телом. В двух последних опытах жидкость наливается при одной и той же температуре и до достижения одного уровня.

Выше были рассмотрены приборы для измерений плотности в лабораторных условиях. Лабораторные приборы предназначены для выполнения высокоточных анализов, исследовательских работ и операций количественного учета веществ при хранении и отпуске. При осуществлении большого количества производственных процессов возникает необходимость вести непрерывные или периодические измерения плотности вещества непосредственно в ходе работ. Приборы, предназначенные для таких измерений, называются автоматическими плотномерами, или коротко

плотномерами [9]. Плотномеры бывают показывающими и самопишущими, причем показывающее и самопишущее устройства могут быть установлены либо вблизи контролируемого объекта, либо на расстоянии от него. Применение плотномеров в сочетании с другими устройствами позволяет также автоматически регулировать плотность вещества в линии [10], если мы говорим о жидких телах.

По принципу действия плотномеры можно разделить на следующие группы [11 – 14]:

- 1) Поплавковые, основаны на зависимости плотности жидкости (газа) и выталкивающей силы, которая действует на поплавок, погруженный в контролируемое вещество;
- 2) Весовые, основаны на непрерывном взвешивании определенного объема жидкости;
- 3) Гидростатические, основаны на измерении давления столба жидкости (газа) постоянной высоты;
- 4) Гидродинамические, основанные на зависимости динамического давления потока вещества от его плотности;
- 5) Радиоизотопные, в которых используется ослабление интенсивности излучения радиоактивных изотопов при прохождении через контролируемое вещество;
- 6) Вибрационные, действие которых основано на зависимости между параметрами упругих колебаний, сообщаемых сосуду с контролируемым веществом или помещенному в вещество телу, и плотностью вещества;
- 7) Ультразвуковые, основанные на измерении скорости распространения или интенсивности ультразвука в веществе;
- 8) Динамические, в которых используется зависимость между плотностью газа и скоростью его истечения через отверстие (или динамическим давлением).

Вибрационные плотномеры. К данному типу плотномеров относят приборы, принцип действия которых основан на зависимости между



плотностью вещества и параметрами упругих колебаний, сообщаемых телу [14]. Выделяют две группы вибрационных плотномеров [15]: амплитудные плотномеры и частотные плотномеры. В амплитудных плотномерах мерой плотности служит амплитуда колебаний резонатора при его постоянной резонансной частоте. Так как амплитуда колебаний резонатора определяется целым рядом факторов, а не только его параметрами, метрологические характеристики амплитудных плотномеров ограничены. Частотные плотномеры измеряют частоту собственных колебаний резонатора (который вместе с обратной связью и приводом образует электромеханический генератор), которая функционально связана с плотностью вещества. Измеряемая частота зависит только от параметров резонатора и не зависит от амплитуды. Поэтому частотные плотномеры обладают более высокими метрологическими характеристиками в по сравнению с амплитудными. Они также превосходят их по удобству обработки полученного выходного сигнала. Основными достоинствами, которые обусловили распространение частотных плотномеров, являются: высокая точность, надежность, высокий уровень чувствительности. Также сюда можно отнести возможность непосредственного преобразования искомой плотности в частотный выходной сигнал, и возможность применения данного вида плотномеров при высоких давлениях для газов и жидкостей. Вместе с тем частотные плотномеры обладают и недостатками, такими как: влияния на параметры резонатора температуры и давления, необходимость специальных мер для компенсации, нелинейность шкалы.

Ультразвуковые плотномеры. Применение ультразвука для измерения плотности веществ является широко распространенной и популярной отраслью плотномеров. К ультразвуковым колебаниям относят такие колебания, частота которых находится за верхним пределом слышимых человеческим ухом звуков. Условно таким пределом считают 20 кГц. Ультразвуковые колебания в материальной среде создают каким-либо колеблющимся телом, которое находится в контакте с этой средой. Плотность среды определяют измерением

скорости распространения ультразвука в теле, при этом принимая коэффициент адиабатической сжимаемости постоянным [16]. Ультразвуковой метод измерения плотности обладает высокой чувствительностью, практически безынерционен и позволяет исключить контакт с испытуемой средой (для жидких и газообразных объектов) [17]. Минусом данного метода является его низкая производительность и большие затраты времени при работе с крупногабаритными объектами.

В настоящее время в разных отраслях науки, техники и производства широко используются радиационные плотномеры. Условно все радиационные плотномеры можно разделить на 2 группы [18]: первая – плотномеры, регистрирующие излучение, прошедшее сквозь исследуемый материал, и вторая – плотномеры, регистрирующие рассеянное в материале излучение. Плотномеры последней группы являются наиболее перспективными, так как позволяют производить измерение плотности при одностороннем доступе к исследуемому объекту. Традиционные методы проектирования гамма-плотнометров основывались на априорном выборе технологической схемы измерения с последующей оптимизацией одного-двух ее параметров, что приводило лишь к незначительному улучшению характеристик проектируемых приборов, с одной стороны, и отсутствию достаточного обоснования используемой технологической схемы измерения – с другой. Эти недостатки, свойственные практически всем известным плотномерам, сказываются в итоге на точности и эксплуатационных характеристиках этих приборов, так как препятствуют дальнейшему развитию методов и средств радиационной плотнометрии.

В развитии гамма – плотнометрии можно выделить четыре этапа [1]:

- 1) Установление связи различных характеристик гамма-излучения, испытывающего взаимодействие с материалом, с геометрией измерения, плотностью и химическим составом материала;

2) Широкие экспериментальные исследования связи энергетических и угловых характеристик гамма – излучения, испытывающего взаимодействие с материалом ОК, с параметрами исследуемой среды;

3) Переход к теоретическим методам исследований, которые обеспечивают большую точность и достоверность полученных результатов;

4) Создание САПР гамма – плотнометрии, ориентированной на широкие исследования на математических моделях с выходом на технологические параметры гамма-плотномеров.

Современная гамма – плотнометрия находится на четвертом этапе своего развития.

Гамма – излучение представляет собой коротковолновые, менее  $10^{-13}$  метра, электромагнитные колебания, возникающие при ядерных превращениях, торможении заряженных частиц средой и аннигиляции. Длины волн этого диапазона таковы, что ярко проявляются корпускулярные свойства колебаний. Исходя из этого гамма – излучение рассматривается как поток нейтральных частиц – квантов, движущихся со скоростью света и обладающих энергией. Виды взаимодействия в значительной мере определяются энергией – важнейшей характеристикой элементарных частиц. В качестве верхней границы обычно принимают значение 10 МэВ, которое не превышает энергии квантов, испускаемых большинством естественных и искусственных радиоактивных изотопов [19]. Нижняя граница менее определена. Для первичных квантов при энергиях менее 20 кэВ происходит преимущественное поглощение. Вместе с тем необходимо учитывать энергии до 10 кэВ и менее для квантов, претерпевших многократное рассеяние. Если пренебречь эффектами взаимодействий, которые вносят незначительный вклад в ослабление излучения, то механизм распределения гамма – квантов в веществе можно описать следующим образом. Взаимодействуя с электронами в большинстве случаев, кванты испытывают некоторое количество столкновений, из-за которых изменяется направление движения квантов,

уменьшается энергия, или же они могут быть поглощены во время любого из столкновений.

Существуют три модификации радиоизотопного метода измерения плотности: методы просвечивания материала узким и широким пучками и метод рассеянного гамма – излучения, получивший название гамма – гамма – метода. Метод просвечивания узким пучком основан на регистрации только первичного гамма – излучения, прошедшего через слой исследуемого материала. Влияние рассеянного гамма – излучения на точность измерений исключается посредством коллимации детектора и оценки с помощью электронной схемы спектрального состава, регистрируемого детектором излучения. Технологическая схема измерения лабораторного варианта реализации данного метода приведена на рисунке 1.1.

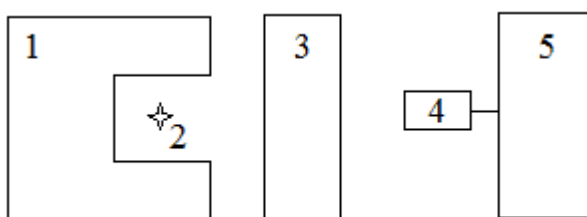


Рисунок 1.1 – Технологическая схема измерения плотности материалов методом просвечивания узким пучком

На рисунке 1.1 изображены: 1 – коллиматор; 2 – источник гамма – излучения; 3 – образец исследуемого материала; 4 – детектор гамма – излучения; 5 – регистрирующая аппаратура.

Погрешности в определении плотности материала связаны с погрешностями измерения толщины слоя просвечиваемого материала, с интенсивностью первичного и прошедшего гамма – излучения, а также с аппаратурными погрешностями, возникающими из-за временной и температурной нестабильности электронной аппаратуры.

Отличительная особенность метода широкого пучка от метода узкого пучка – влияние на результаты измерения регистрируемого детектором

рассеянного гамма – излучения, что существенно усложняет теорию данного метода. Основой для этого метода является технологическая схема измерения, в которой источник излучения расположен на глубине 40 – 50 см, а детектор с регистрирующей аппаратурой на поверхности исследуемой среды.

Для глубинных измерений наиболее перспективным методом является метод рассеянного гамма – излучения. В данном методе источник и детектор гамма – излучения помещают на поверхности исследуемого материала, при этом между источником и детектором имеется защита от прямого гамма – излучения [1].

Традиционная радиационная плотнометрия позволяет с достаточно высокой точностью контролировать те объекты, вариация плотности которых обусловлена только технологическими особенностями процесса уплотнения при постоянном химическом составе [20]. Однако при вариации химического состава имеет место существенная ошибка оценки плотности [21]. Такая проблема существует в горной, атомной, металлургической и других отраслях. Особое значение имеет оценка плотности в условиях непостоянства эффективного атомного номера в медицине [22–27]. При разработке современных средств таможенного контроля также возрастает актуальность визуализации распределения эффективного атомного номера [28]. Наиболее перспективным методом оценки плотности в условиях вариации химического состава является двухэнергетический способ, основанный на регистрации долей прошедшего излучения на двух различных энергиях фотонов, рентгеновской плотнометрии [29, 30]. Если для жидких объектов, однородных по плотности, двухэнергетический метод на основе моноэнергетических источников позволяет получить ее несмещенные оценки, то для объектов с вариациями плотности вдоль вектора распространения излучения данный способ характеризуется систематической погрешностью [31]. Метод дуальных энергий (МДЭ) позволяет одновременно оценивать плотность и эффективный атомный номер материала ОК [32, 33]. Способ [34], который называют спектрометрическим методом, основан на регистрации энергетического

спектра. Спектрометрический метод позволяет свести к минимуму влияние анализируемого эффекта на точность оценки параметров рентгеновским абсорбционным методом и получить, как и в МДЭ, дополнительную информацию об объекте. Спектрометрическая реализация счётного режима регистрации рентгеновского излучения отличается более низкой производительностью по сравнению с другими методами регистрации. Способ компенсации анализируемого эффекта, основанный на предварительной калибровке, является наиболее производительным и простым в реализации.

## 2. Особенности рентгеновской абсорбционной плотнометрии крупногабаритных объектов с переменной толщиной

На рисунке 2.1 приведена упрощенная геометрическая схема рентгеновского абсорбционного измерителя плотности. Для иллюстрации в качестве примера фрагмента объекта контроля выбран прямоугольный параллелепипед толщиной  $H$  и с поперечными размерами  $A \times B$ .

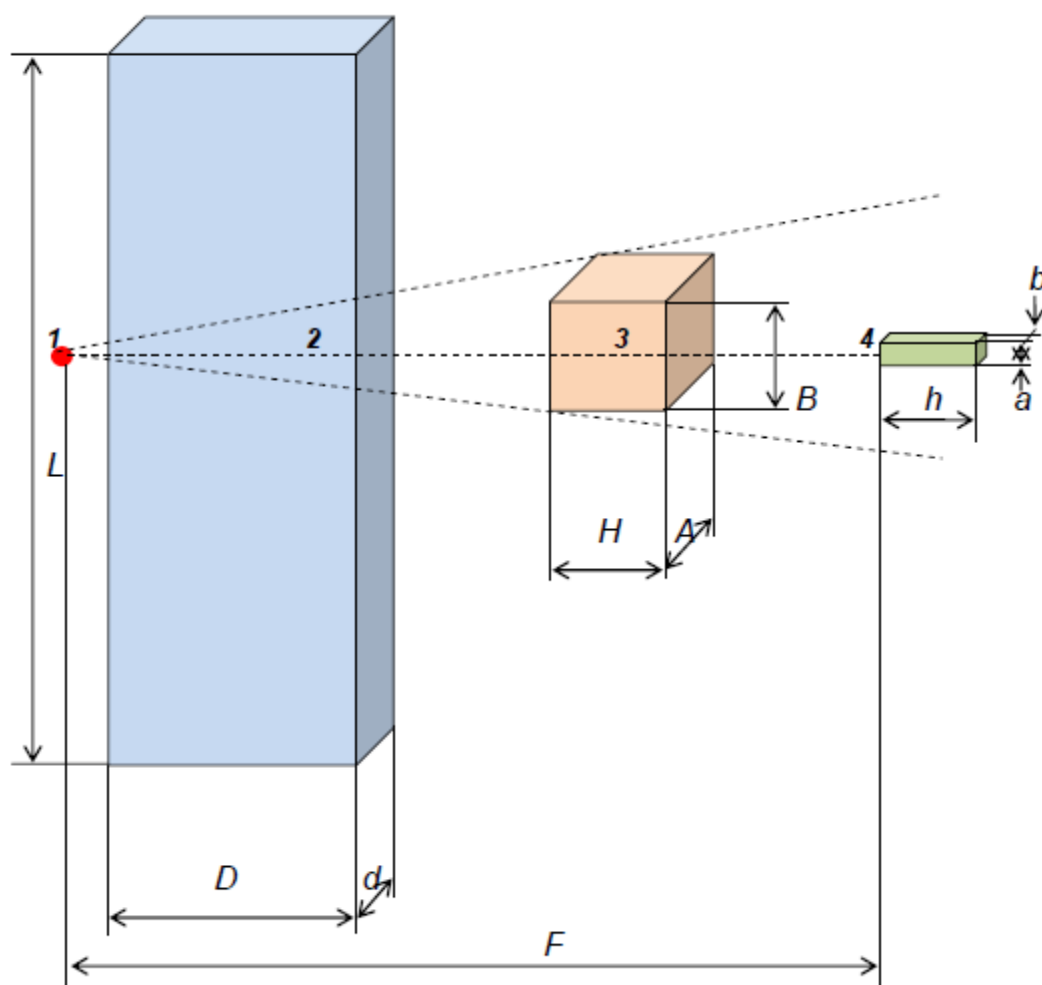


Рисунок 2.1 – Геометрическая схема рентгеновского абсорбционного измерителя плотности:

$1$  – источник излучения;  $2$  – щелевой коллиматор;  $3$  – объект контроля;  $4$  – сцинтиллятор

*Исходные данные.* Точечный источник высокоэнергетического рентгеновского излучения с энергетическим спектром  $f(E, E_0)$ , здесь  $E_0$  – максимальная энергия, расположен на расстоянии  $F$  от сцинтилляционного

детектора. Ось симметрии сцинтилляционного детектора в форме прямоугольного параллелепипеда ориентирована на источник излучения, поперечные размеры детектора –  $a \times b$ , толщина –  $h$ . Геометрические параметры схемы контроля удовлетворяют следующим ограничениям –  $F \gg h > (a \text{ и } b)$ . Пучок излучения ограничен щелевым коллиматором длиной  $L$ , толщиной  $D$  и шириной щели  $d$ . Толщина ОК  $H$  изменяется в диапазоне от  $H_{min}$  до  $H_{max}$ . Текущая толщина  $H$  является заданной по техническим условиям либо определяется инструментальными, электромеханическими и другими методами с высокой точностью.

## **2.1 Формирование, оцифровка и калибровка измерительных сигналов**

*Формирование аналогового радиометрического сигнала.* Энергия, оставленная в сцинтилляционном детекторе фотонами рентгеновского излучения, преобразуется в световое излучение. Световое излучение преобразуется фотодетектором в электрический ток. Значение аналогового сигнала на выходе радиометрического детектора зависит от многих факторов. К указанным факторам относятся: толщина  $H$  объекта и его плотность  $\rho$ ; максимальная энергия рентгеновского излучения  $E_0$ ; толщина  $h$  сцинтиллятора и его материал. Величина  $\rho H$ , равная произведению плотности  $\rho$  на толщину  $H$ , называется массовой плотностью и измеряется в  $\text{г/см}^2$ . Аналоговый сигнал на выходе радиометрического детектора  $J(E_0, \rho H)$  равен сумме сигнала  $I(E_0, \rho H)$ , определяемого поглощенной энергией от зарегистрированных фотонов, и собственными шумами детектора  $p$ :

$$J(E_0, \rho H) = I(E_0, \rho H) + p, \quad (2.1)$$

Уровень собственных шумов детектора  $p$  может быть оценён либо при выключенном источнике рентгеновского излучения, либо при абсолютной



защите детектора от фотонного излучения. Именно второй подход подтверждает корректность записи  $p=J(E_0,\infty)$ .

Помимо уровня собственных шумов детектора  $p$  представляет интерес и сигнал на выходе радиометрического детектора, полученный без объекта контроля, в соответствии с (2.1) его логично обозначить  $J(E_0,0)$ .

*Формирование цифрового сигнала.* Выходной сигнал с детектора оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Главной характеристикой АЦП является его разрядность  $K$ . Интервал квантования  $\Delta$  определяется разрядностью АЦП  $K$  и интервалом изменения оцифровываемого сигнала ( $\min J, \max J$ ). Очевидно, что значение аналогового сигнала максимально при  $H=0$ . В качестве минимального значения аналогового сигнала выбирают нулевой уровень сигнала. Отсюда следует, что интервал квантования определяется с помощью выражения:

$$\Delta = \frac{C_k J(E_0,0)}{2^K - 1}, \quad (2.2)$$

здесь  $C_k, C_k > 1$  – коэффициент, позволяющий учесть возможные отклонения величины максимума аналогового сигнала в большую сторону.

Преобразование аналогового сигнала  $J$  в цифровой сигнал  $J_d$  описывается формулой:

$$J_d = \left[ \frac{J}{\Delta} \right], \quad (2.3)$$

где  $[x]$  – целая часть числа  $x$ .

*Первичная калибровка измерительного сигнала.* Первичная калибровка измерительного сигнала состоит из двух этапов. На первом этапе стадии первичной калибровки определяются два параметра: уровень собственных шумов радиометрического детектора  $J_d(E_0,\infty)$  и уровень сигнала без объекта контроля  $J_d(E_0,0)$ . Указанные уровни оцениваются многократно, поэтому можно считать, что погрешности выборочных средних значений  $\overline{J_d(E_0,\infty)}$  и  $\overline{J_d(E_0,0)}$  близки к нулю. На втором этапе производится калибровка по «чёрному»,

которая сводится к вычитанию значения  $\overline{J_d(E_0, \infty)}$  из цифрового измерительного сигнала. На третьем этапе откалиброванный по «чёрному» измерительный цифровой сигнал нормируется на откалиброванный по «чёрному» цифровой сигнал без объекта контроля. На четвёртом этапе откалиброванный по «чёрному» и по «белому» измерительный сигнал логарифмируется. Итоговое преобразование сигналов описывается выражением:

$$Y_d(E_0, \rho H) = \ln \frac{J_d(E_0, 0) - J_d(E_0, \infty)}{J_d(E_0, \rho H) - J_d(E_0, \infty)}, \quad (2.4)$$

Величину  $Y_d(E_0, \rho H)$  называют лучевой толщиной объекта контроля для рентгеновского излучения с максимальной энергией в спектре  $E_0$ . Зависимость лучевой толщины  $Y_d$  от массовой толщины  $\rho H$  является основой для всего последующего анализа рентгеновского абсорбционного измерителя плотности.

## 2.2 Уравнение рентгеновского абсорбционного измерителя плотности

В наиболее общем виде уравнение, которое связывает плотность материала, толщину ОК и оценку лучевой толщины ОК, записывается следующим образом:

$$P(\rho H) = Y, \quad (2.5)$$

здесь  $P$  – некоторая функция от массовой толщины объекта  $\rho H$  при фиксированном значении  $E_0$ .

Для монотонной непрерывной функции  $P$  существует обратная функция  $P^{-1}$ . Уравнение для нахождения плотности  $\rho$  имеет вид:

$$\rho = \frac{P^{-1}(Y)}{H}, \quad (2.6)$$

Функция  $P^{-1}$  может быть построена по результатам испытаний специально организованного ступенчатого калибровочного объекта.

Калибровочный объект должен быть изготовлен из того же материала, что и ОК. В результате испытания калибровочного объекта формируется набор пар чисел  $(\rho H_i, Y_i)$ ,  $i=1 \dots n$ , здесь  $n$  – количество ступеней в калибровочном объекте. Существует значительное количество видов функций  $G(Y)$ , которыми можно аппроксимировать  $P^{-1}(Y)$ . Ниже будут рассмотрены приближения исследуемой функции  $P^{-1}(Y)$  полиномами.

Систематическая погрешность оценки плотности, обусловленная неточностью описания  $P^{-1}$  функцией того или иного типа, зависит от нескольких факторов. К указанным факторам относится вид функции  $G$ , диапазон изменения массовой толщины объекта, количество параметров аппроксимирующей функции, число и уровни ступеней калибровочного объекта. Влияние факторов, перечисленных выше, на точность оценки плотности может быть исследовано с помощью расчётов и экспериментально.

Для оценки качества приближений наиболее целесообразно использовать критерий максимального поточечного отклонения оцененных значений плотности от номинальных значений:

$$\Delta_\rho = \max_{\rho H_{\min} \leq \rho H \leq \rho H_{\max}} \left| \frac{G(Y)}{H} - \rho \right|. \quad (2.7)$$

Критерий (2.7) позволяет гарантировать то, что систематическая погрешность оценки плотности во всём диапазоне изменения толщин не превысит уровня  $\Delta_\rho$ .

Выбор типа аппроксимации  $G(Y)$ ,  $G(Y) \approx P^{-1}(Y)$  невозможен без анализа функций  $P(\rho H)$ , представляющих собой расчётные или экспериментальные зависимости лучевых толщин объекта контроля  $Y$  от массовых толщин  $\rho H$

### **2.3 Расчёт зависимости $P(\rho H)$ . Формула для расчёта лучевой толщины объекта контроля**

При фиксированном значении максимальной энергии рентгеновского излучения  $E_0$  формула для вычисления  $Y$  – лучевой толщины объекта контроля с массовой толщиной  $\rho H$  имеет вид

$$Y = F(\rho H) = \ln \frac{\int_0^{E_0} \frac{\bar{E}_{ab}(E)}{E} f(E, E_0) (1 - e^{-\mu_{cu}(E)h}) dE}{\int_0^{E_0} \frac{\bar{E}_{ab}(E)}{E} f(E, E_0) e^{-m(E)\rho H} (1 - e^{-\mu_{cu}(E)h}) dE}, \quad (2.8)$$

где  $\bar{E}_{ab}(E)$  – среднее значение энергии, оставленной зарегистрированным фотоном в сцинтилляторе;  $m(E)$ ,  $\mu(E)$  – массовый и линейный коэффициенты ослабления фотонного излучения с энергией  $E$  материалом ОК и материалом сцинтиллятора соответственно. Выражение (2.8) справедливо для интервала квантования  $\Delta=0$ . Вычисления при конечных значениях интервала квантования  $\Delta$  должны учитывать преобразования аналоговых сигналов в цифровые.

При вычислениях лучевых толщин по формуле (2.8) целесообразно использовать таблицы сечений взаимодействия гамма-излучения с веществом [50–51] и методы сплайн-интерполяции [52]. Отметим, что значение  $\bar{E}_{ab}(E)$  зависит от энергии фотонов, материала сцинтиллятора и его размеров [35], причём для детекторов малых поперечных размеров или малой толщины необходимо учитывать не только утечку вторичных рентгеновских фотонов, но и утечку вторичных электронов [53]. В первом приближении зависимости  $\bar{E}_{ab}(E)$  определяются по таблицам [50]. Отношение  $\bar{E}_{ab}(E)/E$  есть не что иное, как доля энергии, оставленная в детекторе зарегистрированным фотоном.

Для учёта преобразования аналоговых сигналов в цифровые необходимо определиться с подходом к выбору разрядности АЦП.

## 2.4 Выбор разрядности АЦП

Одной из составляющих погрешности оценки плотности является  $\Delta_d$  – погрешность преобразования аналоговых сигналов в цифровые. На стадии

проектирования измерителя плотности задаётся предельная погрешность измерения плотности  $\Delta_p$ . Логично требовать выполнение ограничения  $\Delta_d \ll \Delta_p$ , например,  $\Delta_d < 0,3\Delta_p$  для всего диапазона изменения толщины  $H$ . Можно считать, что разрядность АЦП для анализируемой задачи будет достаточной, если будет выполняться условие

$$\left[ \frac{J(E_0, (\rho + \Delta_d) H_{max})(2^K - 1)}{C_k J(E_0, 0)} \right] - \left[ \frac{J(E_0, \rho H_{max})(2^K - 1)}{C_k J(E_0, 0)} \right] \geq 1, \quad (2.9)$$

Напомним, что в формуле (2.9)  $[x]$  – целая часть числа  $x$ .

Для иллюстрации проверим выполнимость (2.9) для следующих условий:  $K=16$ ; изделие из стали с массовой толщиной  $\rho H_{max}=80$  г/см<sup>2</sup>; плотность стали 7,86 г/см<sup>3</sup>;  $E_0=4,5$  и 9 МэВ;  $\Delta_d=0,002$  г/см<sup>3</sup>;  $C_k=1,5$ . Для указанных условий левая часть неравенства (2.9) равна 1 для  $E_0=4,5$  МэВ и 2 для  $E_0=9$  МэВ, то есть разрядность АЦП для условий примера будет достаточной.

## 2.5 Пример расчета $Y(\rho H)$

С целью анализа вида функции  $P^{-1}(Y)$  была проведена серия расчётов зависимостей  $Y(\rho H)$  применительно к объектам из углерода, алюминия и железа для  $0 < \rho H \leq 80$  г/см<sup>2</sup>. Максимальную энергию рентгеновского излучения  $E_0$  варьировали в диапазоне от 2 до 9 МэВ, то есть в диапазоне высокоэнергетического рентгеновского излучения. Радиометрический детектор из  $\text{CdWO}_4$  толщиной 45 мм. Разрядность АЦП  $K=16$ . Энергетический спектр  $f(E, E_0)$  источника рентгеновского излучения описывается линейной убывающей функцией  $f(E, E_0) = 2(E_0 - E)/E_0^2$ . Указанное описание близко к классической формуле Шиффа [23] для рентгеновского излучения с максимальной энергией свыше 1 МэВ.

На рисунке 2.2 приведены типичные зависимости  $Y(\rho H)$ .

Из совместного анализа выражения (2.8) и данных, представленных на рисунке 2.2, можно сделать два основных вывода:

1. Функции  $Y(\rho H)$  являются гладкими и монотонно возрастающими во всём исследуемом диапазоне максимальных энергий рентгеновского излучения.

2. Существует значение  $E_0$ , для которого расхождения зависимостей  $Y(\rho H)$  для различных материалов минимально.

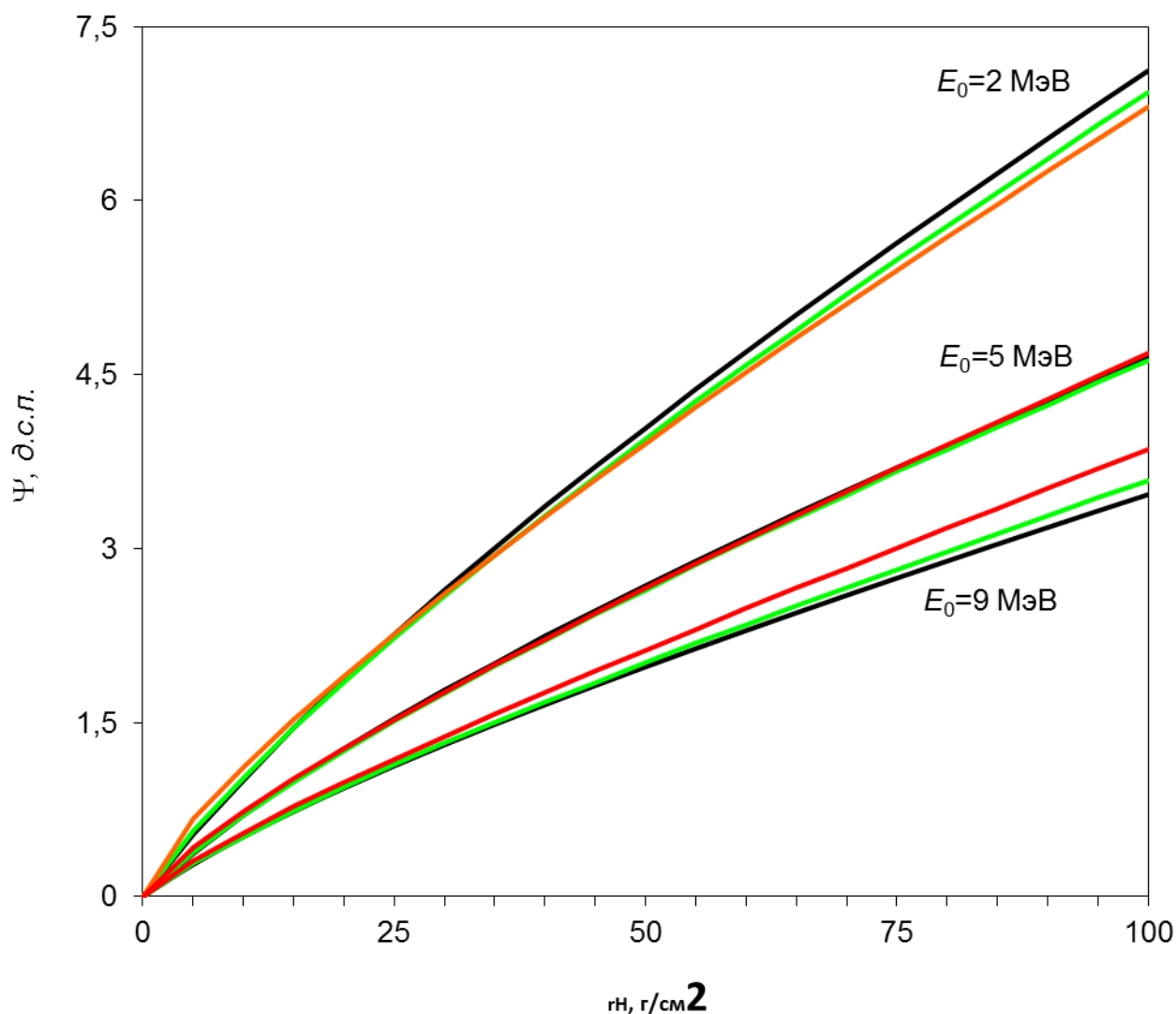


Рисунок 2.2 – Типичные зависимости  $Y(\rho H)$ : — — углерод; — — алюминий; — — железо

Вывод 1 позволяет при выборе функций, аппроксимирующих  $P^{-1}(Y)$ , ориентироваться на приближения анализируемой зависимости полиномами. Вывод 2 может быть использован при проектировании универсальных рентгеновских абсорбционных измерителей плотности, не требующих высокой точности.

## 2.6 Исследование приближений функции $P^{-1}(Y)$ полиномами

Проанализируем подход, связанный с аппроксимацией таблицы значений  $(\rho H_i, Y_i)$ ,  $i=1 \dots n$  функции  $P^{-1}(Y)$  полиномом  $k$ -ой степени. В этом случае функция  $P^{-1}(Y)$  описывается выражением:

$$P^{-1}(Y) \approx \sum_{j=0}^k a_j Y^j, \quad (2.10)$$

где  $a_j, j=0 \dots k$  – коэффициенты полинома.

Коэффициенты  $a_j, j=0 \dots k$  полиномиальной регрессии, аппроксимирующей зависимость  $P^{-1}(Y)$ , находятся методом наименьших квадратов (МНК). Оптимизационная задача МНК выглядит следующим образом:

$$\min_{a_0, a_1, \dots, a_k} \sum_i^n \left( \sum_{j=0}^k a_j Y_i^j - \rho H_i \right)^2. \quad (2.11)$$

Уравнение измерителя с учётом полиномиальной аппроксимации функции  $P^{-1}(Y)$  принимает вид

$$\rho = \frac{\sum_{j=0}^k a_j Y^j}{H}. \quad (2.12)$$

Результаты расчётов, описанных выше, анализировались с целью оценки точности приближения зависимостей  $P^{-1}(Y)$  полиномами  $k$ -ой степени,  $k=2, 3$ . Для этого находились коэффициенты полиномов  $a_i, i=0 \dots k$  методом наименьших квадратов – оптимизационная задача (2.11) и оценивалось качество приближений. Результаты обработки расчётных данных для диапазона массовых толщин объекта испытаний  $15 < \rho H \leq 80$  г/см<sup>2</sup> для полиномов порядка  $k=2$  сведены в таблицу 2.1, а для полиномов порядка  $k=3$  в таблицу 2.2. В таблицах приведены также значения  $\Delta_\rho$ .

Из анализа полученных данных можно сделать вывод о применимости полиномиальной аппроксимации для построения уравнения измерителя плотности рентгеновским абсорбционным методом.

Таблица 2.1– Значения коэффициентов полинома (2.10)  $a_0, a_1, a_2, k=2$  и  $\Delta_p$ 

Материал	Параметр	$E_0, \text{МэВ}$							
		2	3	4	5	6	7	8	9
Углерод, $\rho=1,5 \text{ г/см}^3$	$a_0$	–1,548	–1,802	–1,972	–2,139	–2,284	–2,405	–2,482	–2,527
	$a_1$	10,58	12,31	13,97	15,63	17,27	18,9	20,47	21,96
	$a_2$	0,532	0,833	1,136	1,419	1,673	1,897	2,098	2,286
	$\Delta_p$	0,0137	0,0162	0,0172	0,0179	0,0185	0,0191	0,0195	0,0193
Алюминий, $\rho=2,7 \text{ г/см}^3$	$a_0$	–2,451	–2,455	–2,562	–2,674	–2,774	–2,839	–2,848	–2,844
	$a_1$	11,19	12,95	14,7	16,43	18,11	19,71	21,2	22,59
	$a_2$	0,529	0,829	1,088	1,305	1,474	1,601	1,701	1,776
	$\Delta_p$	0,025	0,0262	0,0285	0,0304	0,032	0,0329	0,033	0,0329
Железо, $\rho=7,86 \text{ г/см}^3$	$a_0$	–4,363	–4,041	–3,989	–3,922	–3,832	–3,748	–3,589	–3,456
	$a_1$	11,84	13,77	15,7	17,45	19,03	20,48	21,71	22,82
	$a_2$	0,526	0,782	0,949	1,057	1,111	1,122	1,121	1,091
	$\Delta_p$	0,0855	0,0789	0,0861	0,0887	0,0879	0,0896	0,0865	0,0855

Таблица 2.2 –Значения коэффициентов полинома (2.9),  $a_0, a_1, a_2, a_3, k=3$  и  $\Delta_p$ 

Материал	Параметр	$E_0, \text{МэВ}$							
		2	3	4	5	6	7	8	9
Углерод, $\rho=1,5 \text{ г/см}^3$	$a_0$	–0,1372	–0,0069	–0,0069	–0,0069	–0,2525	–0,3222	–0,3666	–0,5105
	$a_1$	9,17	10,2	11,35	12,47	13,97	15,23	16,48	17,92
	$a_2$	0,945	1,566	2,176	2,815	3,276	3,82	4,339	4,703
	$a_3$	–0,0371	–0,0782	–0,1267	–0,1894	–0,2387	–0,3096	–0,3866	–0,4428
	$\Delta_p$	0,0003	0,001	0,0002	0,0009	0,001	0,0011	0,0011	0,0015
Алюминий, $\rho=2,7 \text{ г/см}^3$	$a_0$	–0,9426	–0,861	–0,8276	–0,8291	–0,853	–0,9197	–0,9678	–1,016
	$a_1$	9,67	11,05	12,36	13,67	14,98	16,35	17,7	19
	$a_2$	0,986	1,503	2,034	2,539	2,996	3,355	3,645	3,88
	$a_3$	–0,0419	–0,0734	–0,117	–0,1693	–0,2269	–0,2806	–0,3303	–0,3765
	$\Delta_p$	0,0006	0,0012	0,0017	0,0018	0,0019	0,0023	0,0025	0,0028
Железо, $\rho=7,86 \text{ г/см}^3$	$a_0$	–2,342	–2,329	–2,141	–2,083	–2,172	–2,036	–2,019	–1,945
	$a_1$	9,83	11,75	13,22	14,74	16,4	17,59	18,91	20,01
	$a_2$	1,128	1,5	1,941	2,251	2,363	2,58	2,602	2,642
	$a_3$	–0,0555	–0,0785	–0,1225	–0,1617	–0,1822	–0,225	–0,2397	–0,2611
	$\Delta_p$	0,0051	0,0074	0,0073	0,0079	0,0127	0,0094	0,0105	0,0101



Вывод, сделанный выше, справедлив для рассматриваемых диапазонов максимальных энергий рентгеновского излучения и массовых толщин объекта контроля от 15 до 80 г/см<sup>2</sup>.

Можно рекомендовать степень полинома 3 и более. Систематическая погрешность оценки плотности, обусловленная неточностью приближения, не превосходит для углерода 0,0015 г/см<sup>3</sup>, для алюминия 0,0028 г/см<sup>3</sup> и для железа 0,0127 г/см<sup>3</sup>. Указанных погрешностей достаточно для большинства практических приложений.

Ряд выводов, сделанных выше, нуждается в экспериментальной проверке.

## **2.7 Экспериментальные исследования**

### **2.7.1 Экспериментальная оценка зависимости $Y(\rho H)$ для стали**

Экспериментальная оценка зависимости  $Y(\rho H)$  проводилась на комплексе цифровой радиографии с источником высокоэнергетического рентгеновского излучения – малогабаритным импульсным бетатроном МИБ–4/9 (ИНК НИ ТПУ). Характеристики детектора указаны в описании расчётного примера. Узкий пучок рентгеновского излучения формировался щелевым коллиматором. Ширина щели коллиматора  $d=5$  мм. Толщина коллиматора  $D=300$  мм. Расстояние от источника излучения до тестового объекта около 3000 мм. Зависимости  $Y(\rho H)$  оценивались для максимальных энергий рентгеновского излучения  $E_0=4,5$  и 9 МэВ. Исследовались объекты из стали плотностью  $\rho=7,85$  г/см<sup>3</sup>. Для иллюстрации экспериментальные зависимости  $Y(\rho H)$  для стальных фрагментов тестового объекта и максимальных энергий рентгеновского излучения  $E_0=4,5$  и 9 МэВ приведены на рисунке 2.3. Выбор материала фрагментов тестового объекта был обусловлен высоким качеством стального проката. Результаты эксперимента дополнены на рисунке 2.3 зависимостью  $Y(\rho H)$ , рассчитанной по формуле (2.8). Из анализа

результатов, представленных на рисунке 2.3, можно сделать вывод о занижении значений лучевых толщин стальных фрагментов в эксперименте. Для объяснения указанного вывода можно выдвинуть следующую гипотезу: одной из наиболее вероятных причин такого занижения является недостаточная коллимация источника рентгеновского излучения.

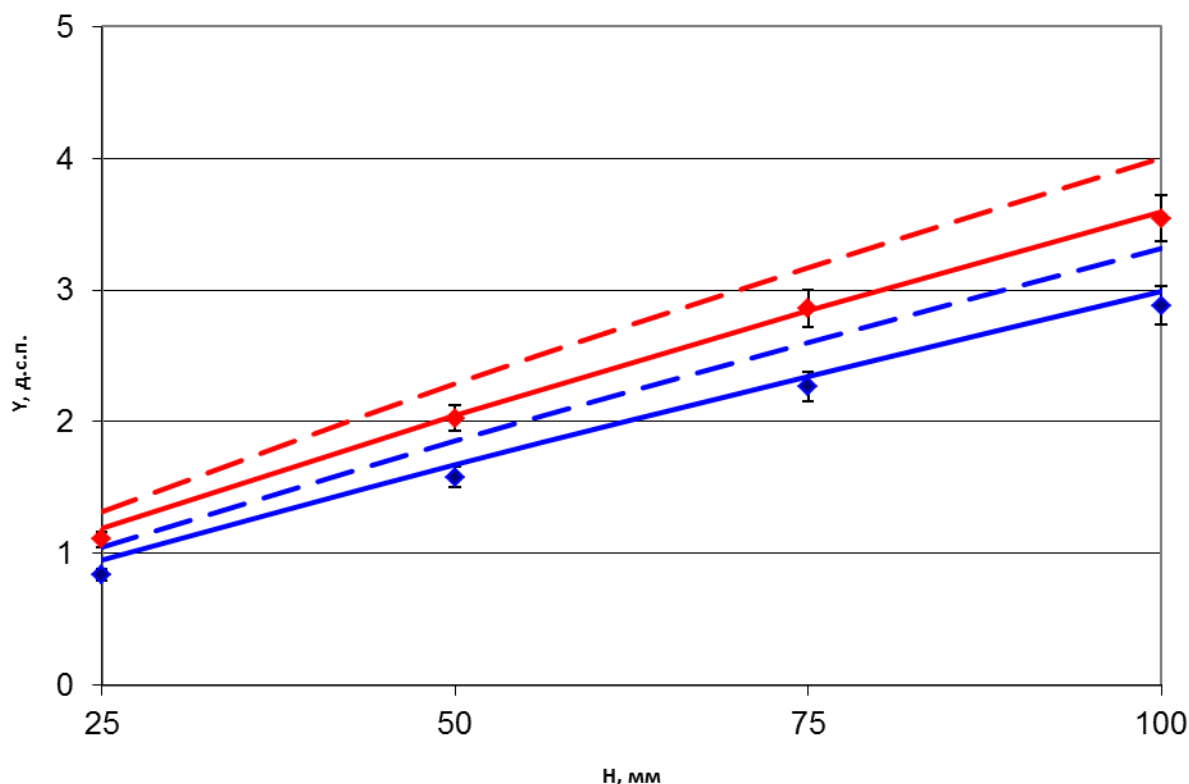


Рисунок 2.3 – Типичные зависимости  $Y(\rho H)$  для стали:  
 $E_0=4,5$  МэВ - - - результаты расчёта;  $\blacklozenge$  – эксперимент;  
 — — — результаты расчёта с поправкой на рассеянное излучение;  
 $E_0=9$  МэВ - - - результаты расчёта;  $\blacklozenge$  – эксперимент;  
 — — — результаты расчёта с поправкой на рассеянное излучение

Для подтверждения указанной выше гипотезы была проведена серия расчётов энергетического коэффициента накопления рентгеновского излучения  $B_E$  методом Монте-Карло для геометрической схемы измерений комплекса высокоэнергетической цифровой радиографии ИНК НИ ТПУ. Исходные данные для расчёта  $B_E$ :  $F=4200$  мм;  $D=400$  мм;  $d=5$  мм;  $A=200$  мм;  $B=200$  мм;  $H$  – варьируемый параметр, изменяющийся от 25 до 125 мм;  $a=5$  мм;  $b=6$  мм;

$h=45$  мм. Учёт рассеяния приводит к трансформации расчётных зависимостей  $Y(\rho H)$  в  $Y^*(\rho H)$ . Выражение, описывающее указанную трансформацию, имеет вид

$$Y^*(\rho H) = Y(\rho H) - \ln B_E(\rho H). \quad (2.13)$$

На рисунке 2.3 приведены зависимости  $Y^*(\rho H)$ , полученные из исходных расчётных зависимостей с помощью формулы (2.13). Сопоставление графиков  $Y^*(\rho H)$  и экспериментальных значений лучевых толщин фрагментов тестового объекта подтвердило справедливость гипотезы о природе смещения результатов расчётов и экспериментов.

### **2.7.2 Экспериментальные уравнения рентгеновского трансмиссионного измерителя плотности**

Вклад фотонов, рассеянных в объекте контроля, приводит к смещению уровня сигналов от уровня модельных сигналов. Здесь под модельным сигналом будем понимать гипотетический сигнал, полученный для идеальной коллимации источника и детектора излучения, то есть вклад рассеяния в интегральный сигнал на выходе радиометрического детектора равен нулю. Изменяется физическая сущность величины  $Y$ , но это не означает невозможность использования обобщённого уравнения измерителя плотности в совокупности с аппроксимацией (2.13) для  $k=3$ .

В таблицу 2.3 сведены коэффициенты полинома третьей степени, аппроксимирующие экспериментальные зависимости  $Y(\rho H)$  для фрагментов тестового объекта из стали для максимальных энергий высокоэнергетического рентгеновского излучения  $E_0=4,5$  и  $9$  МэВ. В таблице указаны также значения предельной погрешности аппроксимации  $\Delta_p$ .

Из анализа данных, приведённых в таблице 2.3, можно сделать вывод о применимости полинома третьей степени (метод с четырьмя параметрами) для практической оценки плотности материала объекта контроля рентгеновским абсорбционным методом.

Таблица 2.3 – Экспериментальные значения коэффициентов  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , и  $\delta$  для изделий из стали,  $\rho=7,85 \text{ г/см}^3$ ,  $k=3$

$E_0$ , МэВ	Параметры				
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$\Delta_p$
4,5	-5,707	25,57	-3,216	0,764	0,0008
9	-3,184	28,35	-1,694	0,5581	0,0086

### **3. Оценка возможности измерения плотности материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий**

#### **3.1 Общие сведения о методе дуальных энергий**

Задача определения плотности различных материалов характерна для многих отраслей науки, промышленности, строительной индустрии, таможенного контроля. Для оценки плотности широко используются радиационные методы, основанные на измерении ослабления или рассеяния гамма- или рентгеновского излучения [1, 63-64]. Применение источников гамма-излучения ограничивается малой удельной активностью, диапазоном энергий излучения, значительным размером излучателя. Источники рентгеновского излучения свободны от этих недостатков. В настоящее время является актуальной проблема, связанная с разработкой высокоточных измерителей плотности крупногабаритных объектов контроля (ОК) с переменной толщиной. Дополнительно от измерителей плотности требуют универсальности, заключающейся в независимости качества измерений от эффективного атомного номера материала ОК. В работе [33] приведена математическая модель многоканального высокоэнергетического абсорбционного рентгеновского измерителя плотности однородных объектов с переменной толщиной. Модель учитывает особенности взаимодействия высокоэнергетического излучения с веществом, преобразования аналоговых сигналов в цифровые сигналы, и включает в себя уравнение плотномера и необходимые ограничения и рекомендации. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований на комплексе высокоэнергетической цифровой радиографии НИ ТПУ с источником излучения бетатроном МИБ-4,5/9 показало значимое смещение оценок плотности [33], обусловленное излучением, рассеянным в ОК. Изменение химического состава материала ОК приводит к смещению оценки плотности

[65]. Указанное смещение вызывается ужесточением пучка рентгеновского излучения за ОК, причем это ужесточение тем значительнее, чем больше толщина ОК и чем больше плотность и эффективный атомный номер материала ОК. Для компенсации этого эффекта в рентгеновской вычислительной томографии используется метод дуальный энергий (МДЭ) [66]. В последнее время МДЭ нашел применение в таможенном контроле, этот метод позволяет идентифицировать материалы ОК. Высокоэнергетическая реализация способа идентификации материалов посредством МДЭ подробно изложена в работе [67]. В МДЭ в результате обработки сигналов, полученных для двух, специальным образом выбранных, максимальных энергий рентгеновского излучения оценивается распределение двух параметров, один зависит от массовой толщины, а второй еще и от эффективного атомного номера ОК. На этом и основана возможность измерения плотности с минимальным влиянием эффективного атомного номера материала ОК. В литературе недостаточно обсуждены вопросы измерения плотности материалов на основе высокоэнергетического МДЭ.

### **3.2 Формирование цифровых теневых радиографических изображений**

Приведем алгоритм формирования первичных цифровых радиографических изображений в методе дуальных энергий. К объекту контроля предъявим самые общие требования. Пусть объект контроля является пространственно связным и выпуклым, а его материал однороден по плотности  $\rho$  и по эффективному атомному номеру вещества  $Z$ .

На рисунке 3.1 приведена стилизованная геометрическая схема сканирования объекта контроля, рассмотренного выше, узкими пучками высокоэнергетического рентгеновского излучения с максимальными энергиями  $E_{\max 1}$  и  $E_{\max 2}$ ,  $E_{\max 1} < E_{\max 2}$ . Рентгеновские кванты, не испытавшие взаимодействия с объектом контроля, регистрируются линейкой

радиометрических детекторов, состоящей структурно из двух линеек детекторов, лобовые поверхности которых перпендикулярны друг другу. Такая схема принята, например, в досмотровых комплексах фирмы Rapiscan Eagle P45 [25–26]. Узкие пучки рентгеновского излучения формируются щелевыми коллиматорами источника излучения и линейки детекторов. На выходе каждого из детекторов формируется аналоговый сигнал, который преобразуется с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в цифровой сигнал.

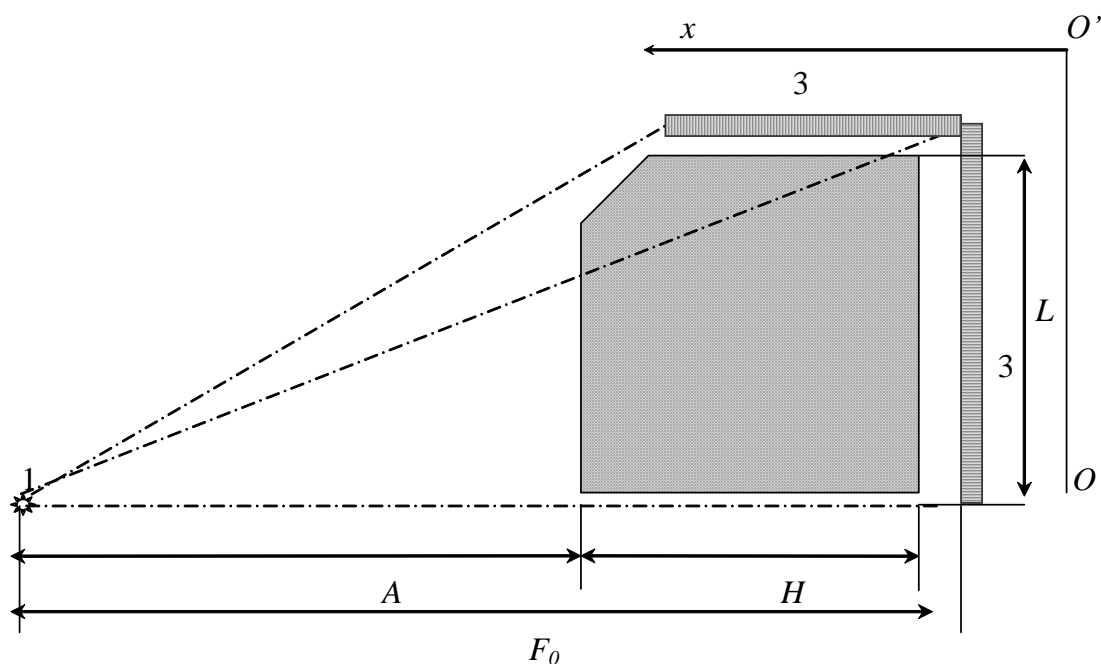


Рисунок 3.1 – Геометрическая схема досмотрового контроля: 1 – источник излучения; 2 – объект контроля; 3 – линейка детекторов

В результате сканирования объекта контроля формируются два исходных цифровых теневых рентгеновских изображения  $\mathbf{P}(E_{\max 1})$  и  $\mathbf{P}(E_{\max 2})$ , строки которых представляют собой распределения цифровых сигналов с радиометрических детекторов по направлению  $OO'x$ , как показано на рисунке 3.1. Общее число радиометрических детекторов равно  $n$ . Направление сканирования  $Oy$  перпендикулярно  $OO'x$ . Время формирования одной строки радиографического изображения равно  $\Delta t$ . Цифровые теневые изображения  $\mathbf{P}(E_{\max 1}) = \{P_{ij}(E_{\max 1}), i = 1, n; j = 1, m\}$  и  $\mathbf{P}(E_{\max 2}) = \{P_{ij}(E_{\max 2}), i = 1, n; j = 1, m\}$  представляют собой двумерные матрицы одинаковых размерностей. Элементы

указанных матриц представляют собой числа, которые меньше  $2^M - 1$ , где  $M$  – разрядность АЦП.

**Замечание 1.** Изображения  $P_{\infty}(E_{\max 1})$  и  $P_{\infty}(E_{\max 2})$ , сформированные в режиме выключенного источника рентгеновского излучения или за ослабляющим барьером большой толщины, должны быть однородными – «черными». Изображения без объекта контроля  $P_0(E_{\max 1})$  и  $P_0(E_{\max 2})$  должны быть однородными – «белыми».

На стадии калибровочных измерений по изображениям  $P_0(E_{\max 1})$ ,  $P_0(E_{\max 2})$  и  $P_{\infty}(E_{\max 1})$ ,  $P_{\infty}(E_{\max 2})$ , полученным без ОК и с выключенным источником излучения, вычисляются средние значения уровней собственных шумов (уровень черного)  $f_i^{P_1}$ ,  $f_i^{P_2}$ ,  $i = 1 \div n$  и поправочные коэффициенты  $k_i^{P_1}$ ,  $k_i^{P_2}$ ,  $i = 1 \div n$  для каждого радиометрического детектора из линейки для двух максимальных энергий рентгеновского излучения. Указанная калибровка может быть совмещена с процессом досмотрового контроля объекта, для этого необходимо, чтобы несколько строк изображения формировались с выключенным излучением, а несколько строк изображения без ОК. Средние значения уровней собственных шумов находятся по формулам:

$$\begin{cases} f_i^{P_1} = \sum_{j=1}^{j_0} P_{\infty ij}(E_{\max 1}) / j_0 \\ f_i^{P_2} = \sum_{j=1}^{j_0} P_{\infty ij}(E_{\max 2}) / j_0 \end{cases}, \quad i = 1 \div n, \quad (3.1)$$

где  $j_0$  – число строк в калибровочных изображениях, полученных с выключенным источником излучения.

Формулы для вычисления поправочных коэффициентов  $k_i^{P_1}$ ,  $k_i^{P_2}$ ,  $i = 1 \div n$  имеют вид:



$$\left\{ \begin{array}{l} k_i^{P_1} = \frac{\sum_{j=j_0+1}^{j_1} P_{0Rj}(E_{\max 1}) - f_i^{P_1}(j_1 - j_0)}{\sum_{j=j_0+1}^{j_1} P_{0ij}(E_{\max 1}) - f_i^{P_1}(j_1 - j_0)} \\ k_i^{P_2} = \frac{\sum_{j=j_0+1}^{j_1} P_{0Rj}(E_{\max 2}) - f_i^{P_2}(j_1 - j_0)}{\sum_{j=j_0+1}^{j_1} P_{0ij}(E_{\max 2}) - f_i^{P_2}(j_1 - j_0)} \end{array} \right., \quad i = 1 \div n, \quad (3.2)$$

здесь  $j_1$  – число строк в калибровочных изображениях, полученных до начала сканирования объекта контроля;  $P_{0Rj}(E_{\max 1})$ ,  $P_{0Rj}(E_{\max 2})$ ,  $j = j_0 + 1, j_1$  – средние значения опорных сигналов, относительно которого выравниваются сигналы с других детекторов. Число строк  $j_0$  и  $j_1$  должно быть таким, чтобы погрешности средних уровней собственных шумов детекторов и поправочных коэффициентов, оцениваемых по формулам (3.1), (3.2), были минимальными. Можно дать следующие рекомендации по выбору опорных детекторов. Они должны иметь минимальный уровень собственных шумов, кроме того они не должны находиться в тени любого контролируемого объекта. Опорные детекторы играют особую роль для рассматриваемой нами задачи, когда источники высокоэнергетического рентгеновского излучения являются импульсными. Нормировка на среднее значение опорного сигнала существенно уменьшает влияние нестабильности параметров высокоэнергетического рентгеновского излучения от импульса к импульсу.

Конечными изображениями первого этапа являются цифровые изображения  $\mathbf{P}^*(E_1)$  и  $\mathbf{P}^*(E_2)$ , представляющие собой распределения приближенных оценок ослабления рентгеновского излучения по плоскости изображения. Соответствующие преобразования элементов первичных изображений  $\mathbf{P}(E_1)$  и  $\mathbf{P}(E_2)$  имеют следующий вид

$$\begin{aligned} P_{ij}^*(E_{\max 1}) &= \frac{(P_{ij}(E_{\max 1}) - f_i^{\mathbf{P}_1})k_i^{\mathbf{P}_1}}{P_{Rj}(E_{\max 1}) - f_R^{\mathbf{P}_1}} \\ P_{ij}^*(E_{\max 2}) &= \frac{(P_{ij}(E_{\max 2}) - f_i^{\mathbf{P}_2})k_i^{\mathbf{P}_2}}{P_{Rj}(E_{\max 2}) - f_R^{\mathbf{P}_2}}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где  $f_R^{\mathbf{P}_1}, f_R^{\mathbf{P}_2}$  – средние значения уровней собственных шумов в опорных сигналах.

Изображения  $\mathbf{P}^*(E_1)$  и  $\mathbf{P}^*(E_2)$  являются входными информативными сигналами для второго этапа обобщенного алгоритма идентификации вещества ОК.

### 3.3 Получение цифровых изображений метода дуальных энергий

Выше отмечено, что конечные цифровые изображения первого этапа  $\mathbf{P}^*(E_{\max 1})$  и  $\mathbf{P}^*(E_{\max 2})$  представляют собой распределения приближенных оценок ослабления рентгеновского излучения по плоскости изображения. Весь дальнейший анализ связан с этим фактом. Указанное соответствие описывается выражением:

$$\begin{cases} P_{ij}^*(E_{\max 1}) \approx \int_0^{E_{\max 1}} E_{\Pi}(E) F(E, E_{\max 1}) e^{-\mu(E)H_{ij}} \varepsilon(h, E) dE \\ P_{ij}^*(E_{\max 2}) \approx \int_0^{E_{\max 2}} E_{\Pi}(E) F(E, E_{\max 2}) e^{-\mu(E)H_{ij}} \varepsilon(h, E) dE \end{cases}, \quad (3.4)$$

где  $F(E, E_{\max 1}), F(E, E_{\max 2})$  – энергетические спектры регистрируемого рентгеновского излучения с максимальными энергиями  $E_{\max 1}$  и  $E_{\max 2}$ ;

$\mu(E)$  – линейный коэффициент ослабления фотонного излучения с энергией  $E$ ;

$E_{\Pi}(E)$  – среднее значение поглощенной энергии для кванта с энергией  $E$ , зарегистрированного детектором;

$\varepsilon(h, E)$  – эффективность регистрации излучения с энергией  $E$ ;

$h$  – толщина зарегистрированного детектора.

Значение  $E_{\Pi}(E)$  зависит от поперечных и продольных размеров радиометрического детектора, а также от материала чувствительного объема детектора [35].

Дальнейшая совместная обработка полученных нормированных изображений специализированным алгоритмом позволяет оценить распределение плотности материала объекта контроля или другого параметра идентификации, то есть построить конечное цифровое изображение, необходимое для идентификации вещества объекта по плотности (параметра идентификации), как по всему объекту, так и его части. Отметим, что принцип формирования цифровых теневых изображений  $P^*(E_{\max 1})$  и  $P^*(E_{\max 2})$  является единым для всех режимов сканирования, энергетических и прочих параметров комплексов цифровой радиографии. Указанные параметры определяют качество анализируемой системы для определения плотности материала, из которого состоит объект контроля.

Высокоэнергетические комплексы цифровой радиографии с функцией идентификации материалов методом дуальных энергий предназначены для идентификации материалов объектов контроля по плотности или другому параметру идентификации в некотором диапазоне толщин. Минимальные значения цифровых сигналов в соотношениях (3.4) определяются для максимально возможной толщины контролируемого объекта.

Для рентгеновских фотонов с энергией свыше 1,022 МэВ наиболее значимыми эффектами взаимодействия фотонов с веществом являются эффект Комптона (некогерентное рассеяние) и эффект рождения пар [36-37], поэтому в методе дуальных энергий зависимость линейного коэффициента ослабления  $\mu$  от энергии  $E$  представляют в следующем виде

$$\mu(E) = a(Z, \rho_e) f_K(E) + b(Z, \rho_e) f_P(E), \quad (3.5)$$

где  $f_K(E)$ ,  $f_P(E)$  – энергетические зависимости сечений эффекта Комптона (некогерентное рассеяние) и эффекта рождения пар соответственно;

$\rho_e$  – плотность электронов;

$Z$  – эффективный атомный номер вещества объекта контроля;

$a(Z, \rho_e), b(Z, \rho_e)$  – зависимости сечений эффекта Комптона и эффекта рождения пар от атомного номера и плотности электронов вещества объекта контроля. С достаточной для практических приложений точностью можно считать, что плотность вещества  $\rho$  пропорциональна плотности электронов вещества  $\rho_e$ .

**Замечание 2.** В потоке регистрируемого излучения наряду с высокоэнергетическими фотонами присутствуют и низкоэнергетические фотоны. Низкоэнергетические фотоны испытывают, помимо эффекта Комптона и эффекта рождения пар, и другие процессы взаимодействия рентгеновского излучения с веществом (фотоэлектрическое поглощение и когерентное рассеяние). Выражение (3.5) не учитывает указанный факт.

С учетом формулы (3.5) система (3.4) может быть переписана в виде системы интегральных параметрических уравнений

$$\begin{cases} \int_0^{E_{\max 1}} E_{\Pi}(E) f(E, E_{\max 1}) \varepsilon(E) e^{-A_{ij} f_1(E) - B_{ij} f_2(E)} dE \approx P_{ij}^*(E_{\max 1}) \\ \int_0^{E_{\max 2}} E_{\Pi}(E) f(E, E_{\max 2}) \varepsilon(E) e^{-A_{ij} f_1(E) - B_{ij} f_2(E)} dE \approx P_{ij}^*(E_{\max 2}) \end{cases}, \quad (3.6)$$

Система (3.6) полностью определена, если известны все зависимости от энергии –  $E_{\Pi}(E)$ ,  $\varepsilon(E)$ ,  $f_1(E)$ ,  $f_2(E)$ ,  $f(E, E_{\max})$ . Известны многочисленные литературные источники, в которых приведены различные аналитические описания указанных выше функций. Аналитические описания представляют интерес для теоретического анализа проблемы идентификации. В практических приложениях система идентификации должна адаптироваться под изменение своих параметров. Адаптация системы возможна на основе комплекса калибровок. Возможны два основных метода решения поставленной задачи. Остановимся подробнее на них.

### 3.3.1 Спектральный метод

Несложно увидеть, что произведение  $E_{\Pi}(E)f(E, E_{\max})\epsilon(E)$  представляет собой не что иное, как энергетический спектр поглощенной энергии в детекторе. Поэтому первый из путей связан с предварительным измерением или оценкой энергетического спектра излучения. Имеются подходы [38], которые позволяют оценить энергетический спектр по кривой ослабления фотонного излучения. Для оценки энергетического спектра в упомянутом методе на стадии калибровочных измерений сканируется объект из одного материала со ступенчато или непрерывно изменяющейся толщиной. В предлагаемом варианте число необходимых теоретических зависимостей сокращается до двух  $f_1(E)$ ,  $f_2(E)$ . Нет необходимости в применении сложных аналитических описаний для этих функций. За последние пятьдесят – шестьдесят лет проведено огромное количество экспериментальных и теоретических исследований [39–41], позволивших создать базы данных по ослаблению гамма-излучения.

В работе [42] подробно рассмотрены вычислительные аспекты, связанные с решением интегрально-параметрических уравнений вида (3.6), даны необходимые рекомендации по выбору методов интегрирования, интерполяции, решения систем нелинейных уравнений.

### 3.3.2 Метод двухпараметрических калибровок

Метод двухпараметрических калибровок основан на предварительном измерении ослабления высокоэнергетического рентгеновского излучения объектами контроля с меняющейся удельной толщиной –  $\rho H$  и меняющимся эффективным атомным номером –  $Z$ .

Пусть мы имеем тестовый объект контроля, состоящий из фрагментов. Для наглядности в таблице 3.1 приведен принцип организации тестового объекта контроля на основе пространственного расположения фрагментов, в

котором удельная толщина фрагмента –  $\rho H$  изменяется по горизонтали, а эффективный атомный номер  $Z$  по вертикали. Такое расположение не является обязательным, но существенно упрощает получение калибровочных параметров.

Известно, что зависимость степени ослабления рентгеновского излучения от толщины объекта контроля описывается выражением

$$\int_0^{E_{\max}} F^*(E, E_{\max}) e^{-\mu(E)H} dE = e^{-\mu_{\text{int}}(E_{\max}, H)H}, \quad (3.7)$$

где  $F^*(E, E_{\max})$  – энергетический спектр поглощенной энергии рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_{\max}$ ;

$\mu_{\text{int}}(E_{\max}, H)$  – интегральный (эффективный) линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения с максимальной энергией  $E_{\max}$  барьером толщиной  $H$ .

Таблица 3.1 – Расположение фрагментов тестового объекта

$Z$	$\rho H$					
	$(\rho H)_1$	$(\rho H)_2$	$(\rho H)_3$	...	$(\rho H)_{n\rho H-1}$	$(\rho H)_{n\rho H}$
$Z_1$	$Z_1, (\rho H)_1$	$Z_1, (\rho H)_2$	$Z_1, (\rho H)_3$	...	$Z_1, (\rho H)_{n\rho H-1}$	$Z_1, (\rho H)_{n\rho H}$
$Z_2$	$Z_2, (\rho H)_1$	$Z_2, (\rho H)_2$	$Z_2, (\rho H)_3$	...	$Z_2, (\rho H)_{n\rho H-1}$	$Z_2, (\rho H)_{n\rho H}$
$Z_3$	$Z_3, (\rho H)_1$	$Z_3, (\rho H)_2$	$Z_3, (\rho H)_3$	...	$Z_3, (\rho H)_{n\rho H-1}$	$Z_3, (\rho H)_{n\rho H}$
	...	...	...	...	...	...
$Z_{nZ-1}$	$Z_{nZ-1}, (\rho H)_1$	$Z_{nZ-1}, (\rho H)_2$	$Z_{nZ-1}, (\rho H)_3$	...	$Z_{nZ-1}, (\rho H)_{n\rho H-1}$	$Z_{nZ-1}, (\rho H)_{n\rho H}$
$Z_{nZ}$	$Z_{nZ}, (\rho H)_1$	$Z_{nZ}, (\rho H)_2$	$Z_{nZ}, (\rho H)_3$	...	$Z_{nZ}, (\rho H)_{n\rho H-1}$	$Z_{nZ}, (\rho H)_{n\rho H}$

Зависимость (3.7) от толщины ослабляющего барьера является ярко выраженной, а зависимость интегрального линейного коэффициента ослабления является менее ярко выраженной. Поэтому для уменьшения динамического диапазона изображения  $\mathbf{P}^*(E_{\max 1})$  и  $\mathbf{P}^*(E_{\max 2})$  трансформируются в изображения  $\mathbf{Y}^*(E_{\max 1})$  и  $\mathbf{Y}^*(E_{\max 2})$  с помощью операции логарифмирования

$$\begin{aligned} Y_{ij}^*(E_{\max 1}) &= -\ln P_{ij}^*(E_{\max 1}) \\ Y_{ij}^*(E_{\max 2}) &= -\ln P_{ij}^*(E_{\max 2}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Для получения конечных изображений метода дуальных энергий – **А** и **В** при рассматриваемом способе калибровок возможны несколько различных подходов. Упомянем некоторые из них.

**Полиномиальная регрессия.** Первый из них заключается в вычислении коэффициентов двумерной полиномиальной регрессии на стадии калибровочных измерений. Пример применения регрессии третьего порядка приведен в работе [43]. Система, связывающая изображения **А**, **В** с изображениями  $\mathbf{Y}^*(E_{\max 1})$ ,  $\mathbf{Y}^*(E_{\max 2})$ , полученными с помощью преобразований (3.8), в этом случае выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} A_{ij} = \alpha_0 + \alpha_1 Y_{ij}^*(E_1) + \alpha_2 Y_{ij}^*(E_2) + \alpha_3 Y_{ij}^*(E_1) Y_{ij}^*(E_2) + \alpha_4 Y_{ij}^{*2}(E_1) + \alpha_5 Y_{ij}^{*2}(E_2) \\ B_{ij} = \beta_0 + \beta_1 Y_{ij}^*(E_1) + \beta_2 Y_{ij}^*(E_2) + \beta_3 Y_{ij}^*(E_1) Y_{ij}^*(E_2) + \beta_4 Y_{ij}^{*2}(E_1) + \beta_5 Y_{ij}^{*2}(E_2) \end{cases}, (3.9)$$

здесь  $E_k = E_{\max k}$ ,  $k = 1, 2$ . Коэффициенты  $\alpha_k, \beta_k, k = 0 \div 5$  находятся на стадии процедуры калибровки в результате просвечивания тестового объекта, фрагменты которого формируются на основе таблицы 3.1.

**Полиномиальная параметрическая регрессия.** Данный подход основан на введении параметра идентификации вещества объекта контроля [44]. В работе [44] доказано, что для моноэнергетического источника фотонного излучения существует однозначная связь плотности вещества объекта контроля и некоторого параметра  $p$ . Выражение для вычисления указанного параметра имеет вид

$$p = \frac{Y^*(E_{\max 2})}{Y^*(E_{\max 1})}. \quad (3.10)$$

Рассмотрим доказательство работы [44]. С учетом формулы (3.5) и известных зависимостей параметров метода дуальных энергий от плотности, эффективного атомного номера и толщины объекта контроля выражение (3.10) может быть записано следующим образом

$$p = \frac{Af_K(E_{02}) + Bf_p(E_{02})}{Af_K(E_{01}) + Bf_p(E_{01})}, \quad (3.11)$$

где  $E_{01}, E_{02}$  – энергии для моноэнергетических источников гамма-излучения. Известны [45] формулы, описывающие зависимости  $A, B$  от  $\rho H$  и  $Z$

$$A = \rho H, \quad B = Z\rho H. \quad (3.12)$$

Из анализа выражений (3.10) – (3.12) следует, что параметр  $p$  для моноэнергетического источника излучения однозначно связан с плотностью объекта контроля.

В предыдущих разделах приведены основные способы получения конечных изображений метода дуальных энергий. Наиболее точным является спектральный метод, но он является наиболее сложным в реализации. Способ полиномиальной регрессии и способ, основанный на вычислении параметра  $p$ , не в полной мере учитывают изменение спектрального состава регистрируемого рентгеновского излучения от толщины объекта контроля. Указанный факт означает, что интегральный линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения  $\mu_{\text{int}}$  для любой максимальной энергии рентгеновского излучения зависит от толщины объекта контроля [46].

**Замечание 3.** Из совместного анализа выражений (3.9) и (3.6) – (3.8) следует, что значения параметров аппроксимации  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  должны равняться нулю, несоблюдение этого требования будет свидетельствовать о некачественно проведенной калибровке «белого». Физическим проявлением этого факта будет то, что участки цифровых изображений  $Y^*(E_{\max 1})$  и



$Y^*(E_{\max 2})$ , которые не затенены объектом контроля, будут «серыми», то есть будут существенно отличаться от уровня «белого»

**Замечание 4.** Изображения  $Y^*(E_{\max 1})$ ,  $Y^*(E_{\max 2})$  могут быть получены в результате дополнительной фильтрации высокоэнергетического рентгеновского излучения. Это повлечет ухудшение производительности контроля, но улучшит точность определения плотности за счет уменьшения систематической погрешности, обусловленной низкоэнергетической составляющей спектра излучения. В случае применения источников высокоэнергетического рентгеновского излучения малой интенсивности, к таким источникам относятся и малогабаритные бетатроны, предлагаемый подход является нецелесообразным.

На выходе этапа 3.2 для первой регрессии мы получаем совокупность параметров  $A_{ij}, B_{ij}, i = 1, n; j = 1, m$ , которые представляют собой два конечных изображения **A**, **B** классической реализации метода дуальных энергий. Изображения **A** и **B** являются входными для третьего этапа рассматриваемого алгоритма.

В случае применения полиномиальной параметрической регрессии на выходе этапа 3.2 мы сразу формируем изображение  $Z = \{Z_{ij}, i = 1, n; j = 1, m\}$ , необходимое для идентификации вещества объекта контроля, поэтому пропускаем этап 3.2.1 и переходим к этапу 3.2.2.

### **3.4 Алгоритм калибровки**

#### **3.4.1 Исходные данные для алгоритма**

На вход алгоритма калибровки поступают два радиографических изображения **P1** и **P2**, первое из них получено сканированием специально организованного тестового объекта (рисунок 3.2) узким пучком рентгеновского

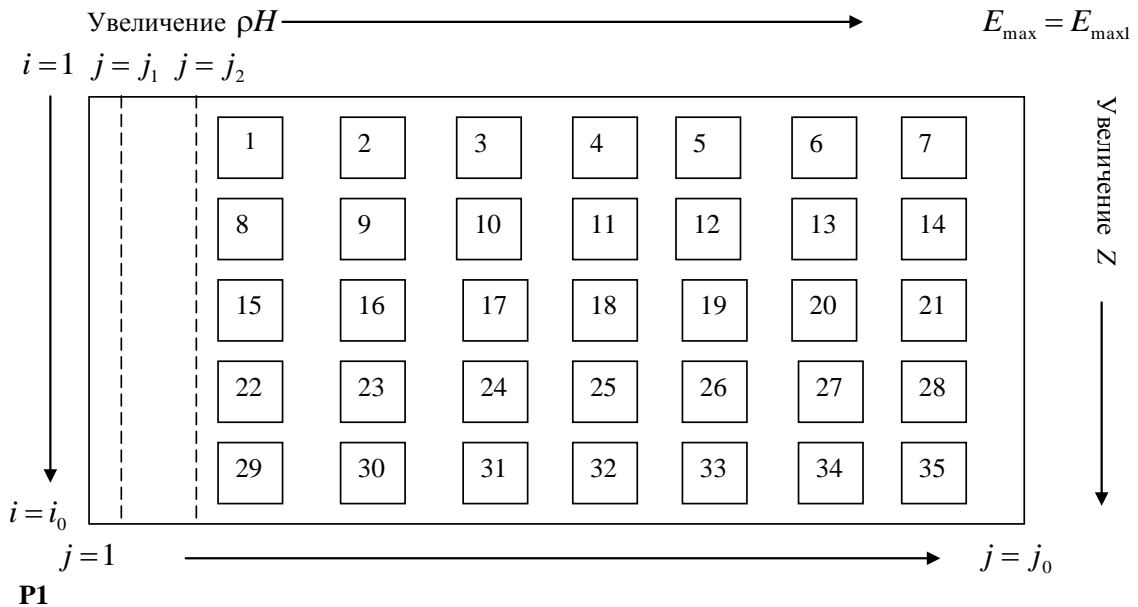
излучения с максимальной энергией  $E_{\max 1}$ , а второе – с максимальной энергией  $E_{\max 2}$ ,  $E_{\max 2} > E_{\max 1}$ .

На рисунке 3.2 приведена структура тестового объекта с указанием расположения фрагментов (количество фрагментов на практике может быть другим).

По горизонтали расположены фрагменты, вещество которых имеет одинаковый эффективный номер  $Z$ , направление увеличения эффективного атомного номера на рисунке 3.2 показано стрелкой.

По вертикали расположены фрагменты, вещество которых имеет одинаковое значение  $\rho H$ , направление увеличения значения  $\rho H$  на рисунке 3.2 также показано стрелкой.

Радиографические изображения **P1** и **P2** представляют собой матрицы размерностью  $i_0 \times j_0$ , где  $i_0$  – количество детекторов в линейке,  $j_0$  – количество шагов сканирования. Элементы матриц представляют собой целые числа, изменяющиеся от 0 до 65535.



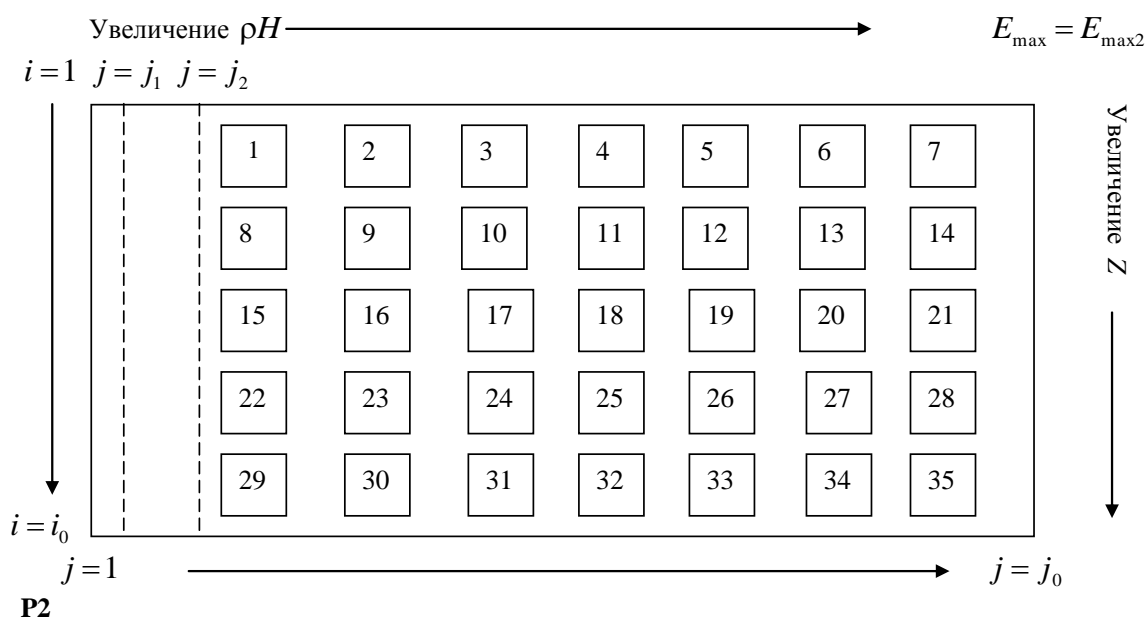


Рисунок 3.2 – Схема первичных радиографических изображений тестового объекта

### 3.4.2 Алгоритм калибровки по эффективному атомному номеру веществ фрагментов тестового объекта контроля (метод дуальных энергий)

Пусть опорный канал имеет номер  $i=1$ . Приведем предварительную реализацию алгоритма калибровки. Возможна ее модификация по результатам экспериментальных исследований.

#### 3.4.2.1 Вычисление фоновых сигналов с радиометрических детекторов

$f_i^{P1}, f_i^{P2}, i=1 \div i_0$ :

$$\begin{cases} f_i^{P1} = \sum_{j=1}^{j_1} P1_{ij} / j_1 \\ f_i^{P2} = \sum_{j=1}^{j_1} P2_{ij} / j_1 \end{cases}, \quad i=1 \div i_0, \quad (3.13)$$

здесь  $j_1$  – количество шагов – сканирование с выключенным или бесконечно ослабленным рентгеновским излучением. Если измерения проводятся с выключенным источником излучения, то  $f_i^{P1} \approx f_i^{P2}$ . Если измерения проводятся за барьером с большой степенью ослабления, то приблизительное равенство может не соблюдаться.

### 3.4.2.2 Вычисление калибровочных коэффициентов $k_i^{P1}, k_i^{P2}, i = 1 \div i_0$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_i^{P1} = \frac{\frac{\sum_{j=j_1+1}^{j_2} P1_{1j}}{j_2 - j_1} - f_1^{P1}}{\frac{\sum_{j=j_1+1}^{j_2} P1_{ij}(E_{\max1})}{j_2 - j_1} - f_i^{P1}}, \quad i = 2 \div i_0, \\ k_i^{P2} = \frac{\frac{\sum_{j=j_1+1}^{j_2} P2_{1j}}{j_2 - j_1} - f_1^{P1}}{\frac{\sum_{j=j_1+1}^{j_2} P2_{ij}(E_{\max1})}{j_2 - j_1} - f_i^{P1}} \end{array} \right. \quad (3.14)$$

Здесь опорный детектор имеет номер  $i=1$ , относительно этого детектора выравниваются сигналы с других детекторов;  $j_2$  – число строк в калибровочных изображениях, полученных до начала сканирования собственно объекта контроля.

### 3.4.2.3 Получение цифровых теневых радиографических изображений тестового объекта контроля **Y1** и **Y2**:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y1_{ij} = -\ln \frac{(P1_{ij} - f_i^{P1})k_i^{P1}}{P1_{1j} - f_1^{P1}} \\ Y2_{ij} = -\ln \frac{(P2_{ij} - f_i^{P2})k_i^{P2}}{P2_{1j} - f_1^{P2}} \end{array} \right., \quad i = 2 \div i_0; j = j_2 + 1 \div j_0, \quad (3.15)$$

Операция логарифмирования совмещена с операцией нормирования, так как на начальной стадии исследований мы ориентируемся на использовании дробно-рациональной регрессии для получения уравнения измерителя эффективного атомного номера.

Для удобства элементы изображений **Y1, Y2** будем называть яркостью.

### 3.4.2.4 Получение полутоновых изображений тестового объекта **Q1, Q2** и вывод их на экран

Процедура преобразования цифровых теневого радиографических изображений тестового объекта **Y1**, **Y2** в полутоновые изображения **Q1**, **Q2** описывается следующей системой:

$$\begin{cases} Q1_{ij} = \frac{(Y1_{ij} - \min\{Y1_{ij}\}) \times 256}{\max\{Y1_{ij}\} - \min\{Y1_{ij}\}} \\ Q2_{ij} = \frac{(Y2_{ij} - \min\{Y2_{ij}\}) \times 256}{\max\{Y2_{ij}\} - \min\{Y2_{ij}\}} \end{cases}, i = 2 \div i_0; j = j_2 + 1 \div j_0, \quad (3.16)$$

Изображения **Q1**, **Q2** не сравниваются друг с другом по контрасту. Они необходимы не только для визуального контроля качества калибровочных измерений, но и для оконтуривания зоны интереса для изображений каждого из фрагментов. Под зоной интереса понимается часть изображения фрагмента, на которую оказали меньшее влияние геометрические и прочие систематические искажения.

Изображения **Q1**, **Q2** отображаются на экране монитора. В результате анализа полученных изображений делается предварительное заключение об их качестве и о возможности перехода к следующему этапу алгоритма.

#### 3.4.2.5 Оконтуривание зоны интереса (внешних и внутренних границ изображений фрагментов)

Пусть тестовый объект состоит из  $K$  фрагментов. Для удобства использования их необходимо пронумеровать, например, так, как показано на рисунке 3.2. Фрагменту под номером  $k$  соответствует пара чисел  $Z_k, (\rho H)_k$ . Характеристики вещества  $k$ -го фрагмента объекта контроля  $Z_k, (\rho H)_k$  измеряются заранее с высокой точностью.

На рис. 3.3 приведено стилизованное изображение фрагмента объекта контроля. Анализировать логичнее первое изображение (с меньшей энергией), так как для него контраст фрагментов на окружающем фоне более выражен, чем на втором изображении.

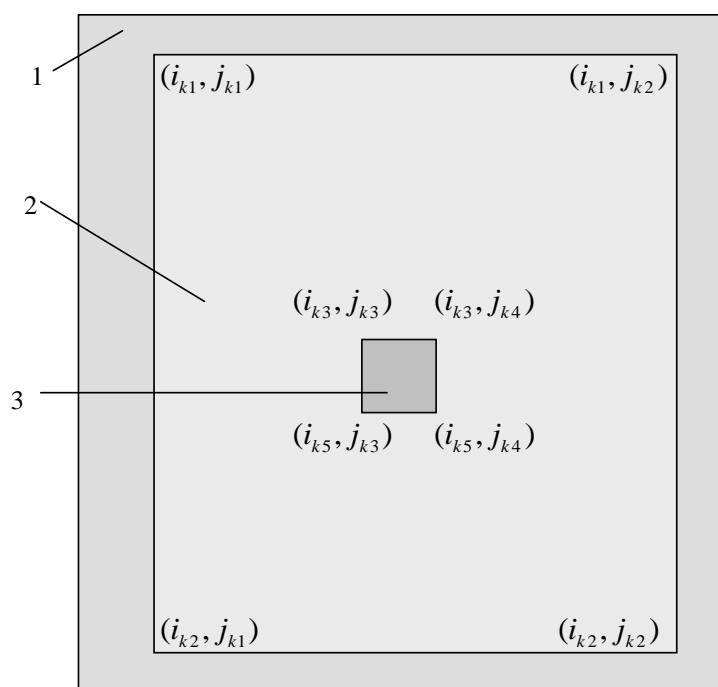


Рис. 3.3 – Стилизованная схема изображения фрагмента контроля:

1 – границная зона изображения фрагмента; 2 – неискаженная область изображения фрагмента; 3 – зона изображения искаженная креплением фрагмента

На изображении объекта контроля следует выделить три основных зоны. В первой из них могут быть заметны геометрические искажения, обусловленные взаимным пространственным расположением фрагмента, источника излучения и детекторов. Свой вклад могут внести и полки, к которым прикреплены фрагменты. Вторая зона изображения фрагмента свободна от систематических искажений. В третьей зоне возможны искажения, обусловленные креплением фрагмента к полкам. Третьей зоны при креплении фрагмента вне центра может и не быть.

Для удобства неискаженная область изображения для каждого фрагмента очерчивается квадратами (прямоугольниками). Причем соответствующие стороны квадратов (прямоугольников) параллельны границам исходных изображений. В результате этого этапа будет сформирован набор интересующих нас областей  $V_k, k = 1 \div K$ . Так как каждый квадрат (прямоугольник) полностью определяется четырьмя точками, то их координаты проще хранить и использовать в процессе дальнейшей обработки. На выходе

рассматриваемого этапа для каждого фрагмента  $k$  формируется набор из восьми целых чисел, полностью определяющий область  $V_k$ .

3.4.2.6 Оценка средних значений и среднеквадратических отклонений яркости в изображениях фрагментов (анализ изображений **Y1** и **Y2**)

Обозначим символами  $R1_k$ ,  $R2_k$  средние значения яркостей изображений  $k$ -го фрагмента для первой и второй энергий рентгеновского излучения. Соответствующие значения среднеквадратических отклонений яркостей обозначим символам  $\sigma1_k$ ,  $\sigma2_k$ .

Выражения для оценки  $R1_k$ ,  $R2_k$  имеют вид:

$$R1_k = \frac{\sum_{(i,j) \in V_k} Y1_{ij}}{\dim V_k}, R2_k = \frac{\sum_{(i,j) \in V_k} Y2_{ij}}{\dim V_k}, \quad (3.17)$$

где  $\dim V_k = \sum_{(i,j) \in V_k} 1$  – число точек в области  $V_k$

Формулы для вычисления  $\sigma1_k$ ,  $\sigma2_k$  выглядят следующим образом:

$$\sigma1_k = \frac{\sum_{(i,j) \in V_k} (Y1_{ij} - R1_k)^2}{\dim V_k - 1}, \sigma2_k = \frac{\sum_{(i,j) \in V_k} (Y2_{ij} - R2_k)^2}{\dim V_k - 1}, \quad (3.18)$$

Значения  $R1_k$ ,  $R2_k$ ,  $k = 1 \div K$  необходимы для определения параметров дробно-рациональной регрессии. Набор  $\sigma1_k$ ,  $\sigma2_k$ ,  $k = 1 \div K$  в совокупности  $R1_k$ ,  $R2_k$ ,  $k = 1 \div K$  позволяет оценить точность оценки средних значений яркости по фрагментам. В результате анализа полученных данных могут быть выдвинуты или скорректированы требования к системе идентификации веществ объектов контроля.

3.4.2.7 Определение параметров полиномиальной регрессии методом наименьших квадратов

Обозначим оценку параметров метода дуальных энергий для  $k$ -го фрагмента символом  $\overline{A_k}$  и  $\overline{B_k}$ . Будем искать оценки  $\overline{A_k}$  и  $\overline{B_k}$  в следующем виде:

$$\begin{cases} \overline{A_k} = \alpha_1 \overline{Y1_k^*} + \alpha_2 \overline{Y2_k^*} + \alpha_3 \overline{Y1_k^* Y2_k^*} + \alpha_4 \overline{Y1_k^*}^2 + \alpha_5 \overline{Y2_k^*}^2 \\ \overline{B_k} = \beta_1 \overline{Y1_k^*} + \beta_2 \overline{Y2_k^*} + \beta_3 \overline{Y1_k^* Y2_k^*} + \beta_4 \overline{Y1_k^*}^2 + \beta_5 \overline{Y2_k^*}^2 \end{cases}, \quad (3.19)$$

где  $\alpha_i, \beta_i, i=1,5$  – коэффициенты полиномиальной регрессии;

$\overline{Y1_k^*}, \overline{Y2_k^*}, k=1, K$  – средние значения лучевых толщин для первой и второй энергий по изображениям  $k$ -ого фрагмента.

Очевидно, что оценка эффективного атомного номера вещества  $k$ -ого фрагмента находится по формуле:

$$\tilde{Z}_k = \frac{\overline{B_k}}{\overline{A_k}}, k=1, K. \quad (3.20)$$

Существуют различные методы нахождения неизвестных векторов для системы (3.19)  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5)$  и  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5)$ , например, [47–48]. Так как мы имеем дело с достаточно зашумленными данными, то воспользуемся методом наименьших квадратов, который сводится к минимизации функционалов  $F_1(\alpha), F_2(\beta)$ :

$$\begin{aligned} F_1(\alpha) &= \sum_{k=1}^{K_0} \left( \alpha_1 \overline{Y1_k^*} + \alpha_2 \overline{Y2_k^*} + \alpha_3 \overline{Y1_k^* Y2_k^*} + \alpha_4 \overline{Y1_k^*}^2 + \alpha_5 \overline{Y2_k^*}^2 - \rho_k H_k \right)^2 \\ F_2(\beta) &= \sum_{k=1}^{K_0} \left( \beta_1 \overline{Y1_k^*} + \beta_2 \overline{Y2_k^*} + \beta_3 \overline{Y1_k^* Y2_k^*} + \beta_4 \overline{Y1_k^*}^2 + \beta_5 \overline{Y2_k^*}^2 - \rho_k H_k Z_k \right)^2, \end{aligned} \quad (3.21).$$

где  $\rho_k, H_k, Z_k$  – плотность вещества, толщина и эффективный атомный номер  $k$ -го фрагмента;

$K_0$  – количество фрагментов, вовлеченных в обработку.

Оптимизационная задача сводится к нахождению значений таких векторов  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5)$  и  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5)$ , при которых значение функционалов  $F_1(\alpha)$  и  $F_2(\beta)$  минимально. Могут быть использованы различные методы оптимизации [49], например, метод приравнивания частных производных по анализируемым параметрам к нулю и решение соответствующих уравнений [48–49], метод покоординатного спуска, градиентного спуска, наискорейшего спуска и др.



Методы минимизации функционалов (3.19) реализованы на всех языках программирования – C, FORTRAN и т.д. Кроме этого, методы оптимизации реализованы в системах математических вычислений MatCad, MatLab, Maple и других. Для небольших значений  $K_0$  на стадии проверки алгоритма идентификации достаточно эффективно можно использовать конструкцию Given minimize из системы MatCad.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **4.1 Предпроектный анализ**

#### **4.1.1 Обоснование необходимости и актуальности разработки**

Среди большого числа показателей качества материалов плотность занимает особое место, так как она во многом определяет такие характеристики, как прочность, долговечность, непроницаемость, морозостойкость и другие [54]. В настоящее время наблюдается всплеск интереса и ученых и производителей к задачам, связанным с измерением плотности. Это обусловлено значительным прогрессом в производстве материалов различного назначения, а также расширением выпуска разнообразных изделий сложной формы и большого размера.

Измерение плотности веществ играет существенную роль при проведении исследовательских работ в различных отраслях науки и техники, а также при осуществлении контроля за технологическими процессами и качеством продукции. Следует отметить большое значение приборов, которые являются весьма важным элементом комплексной автоматизации производственных процессов во многих отраслях промышленности (химической, металлургической, нефтяной и др.).

Потребителей интересует, как правило, информация не о средней плотности по всему объему испытуемого объекта, а о распределение плотности по фрагментам объекта контроля. Поэтому потребителями установок, осуществляющих измерение плотности объектов, являются промышленные компании и таможенные службы. Главным сегментом рынка являются охранные и таможенные организации, целью которых является определение веществ, проносимых либо провозимых через досмотровые точки. Увеличение способов провоза незаконных веществ возрастает, увеличивается

изобретательность контрабандистов, и в связи с этим рентгеновские досмотровые комплексы, работающие на дуальных энергиях, будут находить себе все большее применение.

#### **4.1.2 Анализ конкурирующих разработок с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Данный анализ необходим для детального оценивания существующих на рынке конкурирующих разработок и внесения коррективов в исследование для более успешного противостояния конкурентам.

Данный анализ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для будущего повышения оценок. Позиция разработки и конкурентоспособности оценена по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Для оценочной карты, представленной в таблице 4.1, были выбраны следующие разрабатываемые на сегодняшний день и конкурирующие методы измерения плотности:

- 1 – ультразвуковой метод;
- 2 – радиографический контроль методом дуальных энергий;
- 3 – метод классической радиографии.

Анализ конкурентоспособности технических решений определялся по формуле 4.1:

$$K = \sum B_i B_i , \quad (4.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки;

$B_i$  – вес показателя;

$B_i$  – балл показателя.

Таблица 4.1 – Анализ конкурентоспособности

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б1	Б2	Б3	К1	К2	К3
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Чувствительность	0,1	3	5	4	0,3	0,5	0,4
Производительность	0,1	2	4	4	0,2	0,4	0,4
Времязатраты	0,1	1	4	5	0,1	0,4	0,5
Требуемый контакт с объектом	0,1	1	5	5	0,1	0,5	0,5
Точность	0,1	3	5	4	0,3	0,5	0,4
Мобильность	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
Простота обработки данных	0,1	1	3	2	0,1	0,3	0,2
Визуализация итоговых данных	0,1	2	5	4	0,2	0,5	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
Цена	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,2
Уровень проникновения на рынок	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,2
Срок эксплуатации	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
Финансирование исследований в отрасли	0,05	2	5	3	0,1	0,25	0,15
Итого	1	34	49	45	2,6	4,1	3,8

По результатам данного анализа, можно сделать вывод, что метод дуальных энергий является самым востребованным и перспективным на рынке на данный момент. Метод классической радиографии уходит с первой позиции благодаря более совершенному принципу работы новых установок.

### 4.1.3 FAST-анализ

#### 4.1.3.1 Выбор объекта FAST-анализа

Объектом анализа при проведении работ и написании магистерской диссертации является досмотровый комплекс, установленный в Российско-китайской лаборатории.

#### 4.1.3.2 Описание главной, основных и вспомогательных функций

Все наименования узлов досмотрового комплекса и выполняемые ими функции показаны в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Функции досмотрового комплекса

Наименование	Колич. деталей	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогат.
Бетатрон	1	Создание ионизирующего излучения	X		
Детекторные линейки	16	Приемник излучения	X		
Лебедка	1	Прокат объектов контроля			X
Защитные материалы	20	Защита от проникновения излучения			X
Соединительные кабели	20	Передача информации между объектами			X
ПК	1	Обработка и хранение информации		X	
ОК	15	Просвечиваемые объекты			X

#### 4.1.3.3 Определение значимости выполняемых функций объектом

Для оценки значимости функций будем использовать метод расстановки приоритетов, предложенный Блумбергом В.А. и Глущенко В.Ф. В основу данного метода положено расчетно-экспертное определение значимости каждой функции. При составлении этой и последующих таблиц используются следующие замены: А – бетатрон, Б – детекторные линейки, В – лебедка, Г – защитные материалы, Д – соединительные кабели, Е – ПК, Ж – объекты

контроля. После составления матрицы каждому из знаков приравниваются баллы, при «<» 0,5 балла, при «=» 1 балл, при «>» 1,5 балла. Следующим этапом считается их общая сумма, и определяется значимость каждой из функций путем деления ее баллов на общую сумму. Результаты данных действий занесены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Матрица смежности и значимость функций

	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	Итого	Коэф.
А	=	>	>	>	>	>	>	10	0,21
Б	<	=	>	>	>	>	>	9	0,19
В	<	<	=	<	<	<	<	4	0,08
Г	<	<	>	=	>	<	<	6	0,12
Д	<	<	>	<	=	<	<	5	0,1
Е	<	<	>	>	>	=	>	8	0,16
Ж	<	<	>	>	>	<	=	7	0,14
							Сумма	49	1

#### 4.1.3.4 Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования

В данном этапе нужно определить количество затрат по каждому из узлов объекта исследования. Результаты оценки приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование	Кол.	Выполняемая функция	Трудоемкость детали, нормо-ч	Стоимость материала, т.руб.	Заработная плата, т. руб.	Себестоимость, т. руб.
Бетатрон	1	Создание ионизирующего излучения	2160	700	300	1000
Детекторные линейки	16	Приемник излучения	1080	350	150	500
Лебедка	1	Прокат объектов контроля	2160	10	10	20
Защитные материалы	20	Защита от проникновения излучения	4320	38	2	40
Соединительные кабели	20	Передача информации между объектами	720	5,5	1,5	7
ПК	1	Обработка и хранение информации	2160	9	1	10
ОК	15	Просвечиваемые объекты	2160	4	1	5

#### 4.1.3.5 Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ

Информация об объекте исследования, собранная в рамках предыдущих стадий, на данном этапе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (ФСД), представленной на рисунке 4.1.

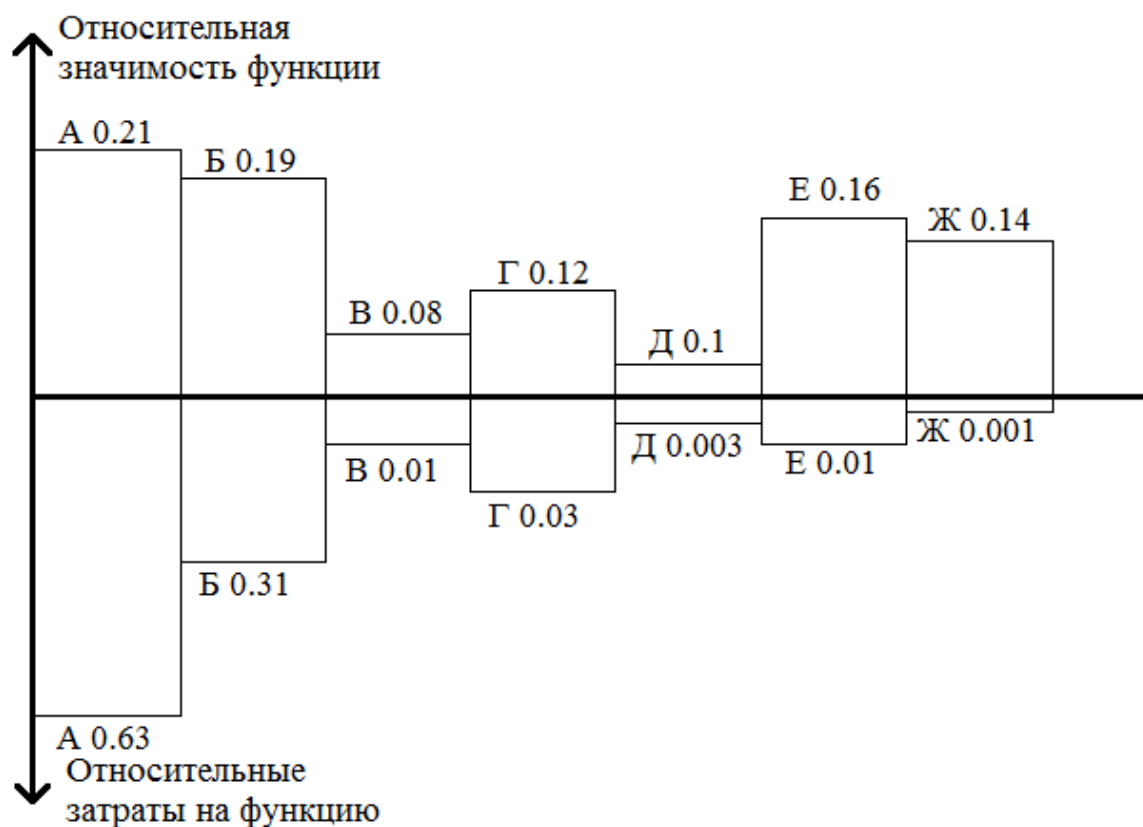


Рисунок 4.1 – Функционально-стоимостная диаграмма

По ФСД можно сделать вывод, что большого дисбаланса в различных функциях не наблюдается. Более значимые узлы стоят дороже, но имеют большой срок эксплуатации. Функции с малым коэффициентом значимости имеют не большую стоимость.

## 4.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ – это комплексный анализ научно-исследовательского проекта, который проводится в три этапа.

Первый этап – описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые появились или могут появиться в его внешней среде. Результаты первого этапа SWOT – анализа представлены в таблице 5.5.



Таблица 5.5 – Комплексный анализ научно-исследовательского проекта

Характеристика	Описание
Сильные стороны	<p>С1. Унифицированность установки.</p> <p>С2. Возможность разработки интуитивно-понятного интерфейса.</p> <p>С3. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С4. Конкурентное преимущество на рынке.</p> <p>С5. Международный проект.</p>
Слабые стороны	<p>Сл1. Метод находится в стадии развития и не идеален.</p> <p>Сл2. Большие габариты установки, низкая мобильность.</p> <p>Сл3. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p>
Возможности	<p>В1. Использование установки в новых областях.</p> <p>В2. Появления дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В3. Обучение новых специалистов для работы с данной установкой.</p> <p>В4. Повышение производительности контроля, последующая модернизация метода.</p> <p>В5. Снижение поглощенной объектом дозы.</p> <p>В6. Выход на международный рынок.</p>
Угрозы	<p>У1. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p> <p>У2. Прекращение международного контракта</p> <p>У3. Развитая конкуренция технологий производства.</p>

Второй этап – выявление соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Каждый фактор помечен либо знаком «+» (сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». В рамках данного этапа построена интерактивная матрица проекта, приведенная в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны					Слабые стороны		
		C1	C2	C3	C4	C5	Сл1	Сл2	Сл3
Возможности проекта	B1	+	+	+	+	+	+	+	+
	B2	+	+	-	+	+	+	+	+
	B3	+	+	+	+	-	+	-	+
	B4	+	-	-	+	-	+	-	-
	B5	+	-	-	+	-	+	-	-
	B6	+	+	-	+	+	+	-	+
Угрозы проекта	У1	-	-	+	-	+	-	-	-
	У2	-	-	+	+	+	+	-	+
	У3	+	+	-	+	+	+	+	+

Третий этап – составление итоговой матрицы SWOT – анализа. Результаты данного этапа представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – SWOT-анализ

	Сильные стороны	Слабые стороны
Возможности проекта	Данная установка будет использоваться для большего круга потребителей в связи с унификацией. Дополнительный спрос на рынке появится в следствие конкурентного преимущества и международного характера работы. Также более понятный интерфейс повысит спрос на данную установку.	Данный метод находится в стадии разработки, в связи с чем на данный момент может наблюдаться преимущество конкурентов на рынке. Также необходимо восполнять пробелы с квалифицированными кадрами для работы данной установки.
Угрозы проекта	Прекращение контракта и несвоевременное финансирование может приостановить разработку на некоторое время.	Проект, находящийся в стадии развития, уязвим по сравнению с конкурентами и требует постоянной финансовой поддержки.

## 4.3 Инициация проекта

### 4.3.1 Цели и результат проекта

Цель исследований – разработка методик выбора и оценки параметров и характеристик комплекса рентгеновского абсорбционного измерителя плотности. Необходимо разработать математический алгоритм определения плотности многокомпонентных объектов, обладающей большей производительностью, чем нынешние аналоги. Результатом данного исследования является разработка нового алгоритма контроля многокомпонентных объектов высокоэнергетическим малодозовым методом дуальных энергий. Стейкхолдеры исследования представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
ИНК, НИ ТПУ, РФ	Выполнение международного контракта, разработка новой технологии
Лаборатория интроскопии №40	Разработка новой технологии, новые потребители технологии
X-Scan, КНР	Приобретение алгоритмов контроля, более подробная разработка досмотрового комплекса
Абашкин А. Д.	Разработка новой технологии, защита диссертации
Таможенные службы	Потенциальные потребители нового алгоритма, потенциальные покупатели досмотрового комплекса на основе бетатронов

### 4.3.2 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта включает в себя рабочую группу данного проекта, роль каждого участника, а также функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Рабочая группа проекта представлена в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – организационная группа проекта

№	Ф.И.О., должность	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, дн
1	Абашкин А.Д., магистрант	Исполнитель	Выполнение запланированных по проекту работ	486
2	Штейн А.М., ассистент кафедры ФМПК	Исполнитель	Выполнение запланированных по проекту работ	486
3	Осипов С.П., в.н.с. Российско- китайской научной лаборатории радиационног о контроля и досмотра	Руководитель	Консультирование по экспериментальной деятельности исполнителя	425
Итого				1360

## 4.4 Планирование управления научно-техническим проектом

### 4.4.1 Контрольные события проекта

Таблица 4.10 – контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Даты	Результат
1	Ознакомление со способами измерения плотности рентгеновскими методами	09.14 - 10.14	Письменный отчет
2	Анализ научно – технической литературы и патентов	10.14 – 11.14	Письменный отчет

Продолжение таблицы 4.10

№	Контрольное событие	Даты	Результат
3	Приобретение практических навыков работы с базами данных по взаимодействию гамма-излучения с веществом	11.14 – 12.14	Письменный отчет
4	Сравнение различных реализаций рентгеновского абсорбционного способа оценки плотности	01.15 – 02.15	Письменный отчет
5	Разработка математической модели рентгеновского абсорбционного способа оценки плотности методом дуальных энергий	03.15 – 04.15	Письменный отчет
6	Написание программы для имитации рентгеновского измерителя плотности на основе метода дуальных энергий	05.15 – 06.15	Письменный отчет
7	Цикл натуральных экспериментов по оценке плотности методом дуальных энергий	09.15 – 10.15	Письменный отчет
8	Цикл вычислительных экспериментов по оценке влияния различных физических факторов на точность оценки плотности методом дуальных энергий	10.15 – 11.15	Письменный отчет
9	Разработка алгоритма обработки информации в методе дуальных энергий, позволяющего оценить плотность объекта контроля	11.15 – 12.15	Письменный отчет

#### Продолжение таблицы 4.10

№	Контрольное событие	Даты	Результат
10	Проверка эффективности алгоритма обработки информации в методе дуальных энергий, позволяющего оценить плотность объекта контроля	01.16 – 02.16	Письменный отчет
11	Формулировка рекомендаций по выбору основных параметров рентгеновского абсорбционного измерителя плотности методом дуальных энергий	03.16 – 04.16	Письменный отчет
12	Оформление диссертации, подготовка доклада для защиты	04.16 – 06.16	Диссертация

#### 4.4.2 План проекта

Таблица 4.11 – Календарный план проекта

Код работ	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Ознакомление со способами измерения плотности рентгеновскими методами	30	09.14	10.14	Абашкин А.Д.
2	Анализ научно – технической литературы и патентов	31	10.14	11.14	Абашкин А.Д.
3	Приобретение практических навыков работы с базами данных по взаимодействию гамма-излучения с веществом	61	11.14	12.14	Абашкин А.Д. Штейн А.М.

Продолжение таблицы 4.11

Код работ	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
4	Сравнение различных реализаций рентгеновского абсорбционного способа оценки плотности	60	01.15	02.15	Абашкин А.Д. Штейн А.М. Осипов С.П.
5	Разработка математической модели рентгеновского абсорбционного способа оценки плотности методом дуальных энергий	61	03.15	04.15	Осипов С.П. Абашкин А.Д. Штейн А.М.
6	Написание программы для имитации рентгеновского измерителя плотности на основе метода дуальных энергий	61	05.15	06.15	Осипов С.П. Штейн А.М.
7	Цикл натурных экспериментов по оценке плотности методом дуальных энергий	61	09.15	10.15	Абашкин А.Д. Штейн А.М.
8	Цикл вычислительных экспериментов по оценке влияния различных физических факторов на точность оценки плотности методом дуальных энергий	61	10.15	11.15	Осипов С.П. Абашкин А.Д. Штейн А.М.

Продолжение таблицы 4.11

Код работ ы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
9	Разработка алгоритма обработки информации в методе дуальных энергий, позволяющего оценить плотность объекта контроля	61	11.15	12.15	Осипов С.П.
10	Проверка эффективности алгоритма обработки информации в методе дуальных энергий, позволяющего оценить плотность объекта контроля	60	01.16	02.16	Абашкин А.Д. Штейн А.М. Осипов С.П.
11	Формулировка рекомендаций по выбору основных параметров рентгеновского абсорбционного измерителя плотности методом дуальных энергий	61	03.16	04.16	Осипов С.П. Штейн А.М.
12	Оформление диссертации, подготовка доклада для защиты	61	04.16	06.16	Абашкин А.Д.

Календарный план НИОКР приведен в приложении 1.



## 4.5 Бюджет научного исследования

### 4.5.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

В таблице 4.12 представлена информация о затратах на приобретение всех видов материалов, комплектующих и полуфабрикатов, необходимых для проведения исследований с указанием потребного количества, цены за единицу и общей суммы.

Таблица 4.12 – Материалы необходимые для проведения исследований

Наименование	Размерность	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Цемент	кг	5	24	120
Песок	мешок	1	95	95
Алюминий	кг	5	70	350
Медь	кг	1	270	270
Мука	кг	10	45	450
Железо	кг	3	210	630
Сталь	кг	5	440	2200
Перчатки	шт	2	32	64
Бумага формата А4	уп	1	320	320
Чернила	шт	1	540	540
Всего за материалы				5039
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				251,95
Итого по статье $C_m$				5290,95

#### 4.5.2 Специальное оборудование для экспериментальных работ

В таблице 4.13 представлена информация о всех затратах, связанных с приобретением, изготовлением, арендой специального оборудования, необходимого для проведения экспериментальных работ, а также об амортизационных отчислениях специальных приборов и устройств, имеющихся в научно-технической лаборатории, занимающейся проектом.

Таблица 4.13 – Расчет затрат на спецоборудование для научных работ

№	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Бетатрон	1	1000	1000
2	Детекторные линейки	16	30	480
3	Лебедка	1	20	20
4	Защитные материалы	20	2	40
5	Соединительные кабеля	20	0,35	7
6	ПК	1	10	10
Итого				1557

При выполнении экспериментальных работ по данному проекту использовалось имеющееся в научно-технической организации оборудование. Начисление амортизации выполняется только на оборудование стоимостью более 100 000 рублей.

Формула для расчета амортизационных отчислений (4.2):

$$C_a = \sum_i^n \frac{C_{\text{бал}} \cdot H_a \cdot g_i \cdot t}{\Phi_{\text{эф}}}, \quad (4.2)$$

где  $C_{бал}$  – балансовая стоимость  $i$ -го вида оборудования, руб;

$H_a$  – норма годовых амортизационных отчислений;

$g_i$  – количество единиц  $i$ -го вида оборудования;

$t$  – время работы  $i$ -го вида оборудования;

$\Phi_{эф}$  – эффективный фонд времени работы оборудования (250 дней).

В таблице 4.14 приведен расчет затрат по статье «Спецоборудование» с учетом амортизации.

Таблица 4.14 – Расчет затрат на спецоборудование с учетом амортизации

№	Наименование оборудования	Балансовая стоимость, руб.	Норма амортизации, %	Время работы, час	Сумма амортизации, руб.
1	Бетатрон МиБ 9-4,5	1000000	15	2160	54000
2	Детекторные линейки	480000	15	1080	12960
	Итого				66960

#### 4.5.3 Расчет основной и дополнительной заработной платы, отчислений на социальные нужды и накладные расходы

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. Основная заработная плата включает в себя премию, выплачиваемую ежемесячно из фонда заработной платы.

Основная заработная плата работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле 5.3:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.3)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата  $Z_{\text{осн}}$  руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле 4.4:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (4.4)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 4.5:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (4.5)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 рабочих дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (при 5-дневной рабочей недели составляет 227 дней).

Расчет основной заработной платы сведен в таблицу 4.15.

Таблица 4.15 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Исполнители по категориям	Должность	Трудо- емкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), руб.
1	Руководитель Осипов С.П.	в.н.с., к.т.н.	170	1352,73	229964,1

Продолжение таблицы 4.15

2	Исполнитель Штейн А.М.	м.н.с	200	695,63	139126
3	Исполнитель Абашкин А.Д.	м.н.с.	220	695,63	153038,6

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (4.6)$$

где  $З_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб.;

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент;

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок;

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

В ТПУ премии и доплаты включены в базовый оклад. Отдельно добавляется надбавка за опасные условия работы с радиацией равная 1,3. Расчет основной заработной платы с учетом коэффициентов за весь проектный период сведен в таблицу 4.16.

Таблица 4.16 – Расчет основной заработной платы с учетом коэффициентов за весь проектный период

Исполнители	$З_{\text{б}}$ , руб.	$k_{\text{р}}$	$k_{\text{д}}$	$З_{\text{м}}$ , руб	$З_{\text{дн}}$ , руб.	$T_{\text{р}}$ , раб. дн.	$З_{\text{осн}}$ , руб.
Руководитель Осипов С.П.	27417	1,3	1,3	46334,73	1352,73	170	229964,1
Исполнитель Штейн А.М.	14099	1,3	1,3	23827,31	695,63	200	139126
Исполнитель Абашкин А.Д.	14099	1,3	1,3	23827,31	695,63	220	153038,6
	Итого						522128,7

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10 – 15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле 4.7:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (4.7)$$

где  $З_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

$З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

Коэффициент дополнительной заработной платы  $k_{\text{доп}} = 0,15$ , который исходит из 15% от основной заработной платы. В таблице 4.17 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы за весь проектный период.

Таблица 4.17 – Заработная плата исполнителей за весь проектный период

Заработная плата за проектный период	Руководитель Осипов С.П.	Исполнитель Штейн А.М.	Исполнитель Абашкин А.Д.
Основная зарплата, руб.	229964,1	139126	153038,6
Дополнительная зарплата, руб.	34494,62	20868,9	22955,79
Зарплата, руб.	264458,72	159994,9	175994,39
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	600448,01		

Отчисления во внебюджетные фонды рассчитывается по формуле 4.8:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (4.8)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (составляет 30%).

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 600448,01 = 180134,4 \text{ руб.}$$

Накладные расходы включают в себя затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Накладные расходы составляют 80 – 100 % от суммы

основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле 4.9:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (4.9)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,9 \cdot 600448,01 = 540403,21 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по статьям затрат составлена калькуляция плановой себестоимости научно-технического исследования (таблица 4.18).

Таблица 4.18 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.
1	Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты	77000
2	Специальное оборудование с учетом амортизации	1546960
3	Основная заработная плата	522128,7
4	Дополнительная заработная плата	78319,31
5	Отчисления на социальные нужды	180134,4
6	Накладные расходы	540403,21
7	Итого плановая себестоимость	2944945,62

#### 4.6 Реестр рисков проекта

Риски проекта – это возможные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой негативные эффекты.

При рассмотрении рисков проекта уровень риска (высокий, средний, низкий) зависит от вероятности его наступления и того, в какой степени он влияние на проект. Реестр рисков по данному проекту представлен в приложении 2.

## 5. Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса. Объектом является досмотровый комплекс, установленный в лаборатории № 40 НИ ТПУ.

### 5.1 Производственная безопасность

#### 5.1.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов

Таблица 5.1- Основные элементы досмотрового комплекса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Обработка результатов измерений за компьютером	Воздействие излучений (электромагнитное и радиочастотное);  Недостаточная освещенность рабочей зоны;  Отклонение показателей микроклимата от нормальных;  Влияние шума	Электрический ток	СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 [55];  ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ [56];  СНиП 23-05-95 [57];  СанПиН 2.2.4.548-96 [58];
Работа с рентгеновской установкой	Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне		НРБ-99/2009;  СП 2.6.1.2523-09 [59]



Рассмотрим выявленные факторы более подробно.

### **5.1.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов**

#### **5.1.2.1 Воздействие излучений**

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [55] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц - 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц - 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц - 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц - 25нТл.

Для уменьшения воздействия электромагнитного излучения на организм необходимо выполнять следующие меры:

- расстояние до монитора должно составлять не менее 50 см;
- не допускается использование мерцающего монитора (нужно использовать монитор с частотой кадров не менее 70 Гц);
- расположение верхнего края монитора должно располагаться на уровне глаз;
- не допускается освещение экрана прямыми яркими источниками света;
- использование монитора с низким разрешением;
- необходимы регулярные перерывы в работе.

#### **6.1.2.2 Электрический ток**

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с

комплексом в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор установки работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта частей досмотровой установки;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей компьютера или установки);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности бетатрона МИБ-9 и связанного с ним комплекса сводятся к следующим действиям: отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы; вывешивание плакатов, указывающих место работы; заземление корпусов всех установок через нулевой провод; покрытие металлических поверхностей инструментов надёжной изоляцией; недоступность токоведущих частей аппаратуры (токоведущие части и элементы необходимо закрывать в непроводящие ток корпуса).

#### 5.1.2.3 Недостаточная освещенность

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света. Помещения со специальным оборудованием должны

иметь естественное и искусственное освещение [57]. Для данного типа работ минимальная освещенность в лаборатории должна составлять 300-500 лк. В следствие производственной необходимости работа в лаборатории производится без естественного освещения, данные условия согласованы с органами государственного надзора за охраной труда. Общее освещение лаборатории должно быть выполнено в виде сплошных или прерывистых линий светильников, которые располагаются в стороне от рабочих мест параллельно линии зрения работников. Допускается размещение линии светильников искусственного освещения локально над рабочими местами. Для общего освещения необходимо применять светильники с рассеивателями и зеркальными экранами сетками или отражателями, укомплектованные высокочастотными пускорегулирующими аппаратами. Применение светильников без рассеивателей и экранных сеток запрещается.

#### 5.1.2.4 Отклонение показателей микроклимата от нормальных

Воздух рабочей зоны производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [58] и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может

осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека - не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность - 40%, скорость движения воздуха - 0,1 м/с, температура летом -20..25 °С, зимой - 13...15 °С.

#### 5.1.2.5 Повышенный уровень шумов

Повышенный шум ухудшает условия труда, оказывает вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум в лаборатории создается работающим оборудованием досмотрового комплекса (бетатрон и линейки), установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. На рабочем месте лаборанта и инженера лаборатории уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Для снижения уровня шумов бетатрон МИБ-9 заключен в специальный корпус, ослабляющий в том числе и звуковые колебания. Электронная часть и линейки так же закрыты в специальный металлический корпус.

#### 5.1.2.6 Повышенный уровень ионизирующего излучения

Защита персонала и гражданского населения в соответствии с нормативами [59] обеспечивается конструкцией радиационной защиты специально оборудованного помещения, в котором располагается экспериментальная рентгеновская установка. К работе с досмотровым комплексом допускается предварительно обученный персонал группы А и Б. Для инженеров лаборатории (персонал группы А) допустимая эффективная доза составляет 20 мЗв в год в среднем за последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год. Облучение эффективной дозой свыше 200 мЗв в течение года

должно рассматриваться как потенциально опасное. Лица, подвергшиеся такому облучению, должны немедленно выводиться из зоны облучения и направляться на медицинское обследование. Последующая работа с источниками излучения этим лицам может быть разрешена только в индивидуальном порядке с учетом их согласия по решению компетентной медицинской комиссии.

Мероприятия для предотвращения облучения выше нормы. Перед проведением эксперимента персонал заблаговременно обязан покинуть помещение с рентгеновской установкой, плотно закрыть двери и убедиться, что все необходимые условия безопасности выполнены. Работа рентгеновского аппарата сопровождается звуковым сигналом с временным запасом 10 секунд, таким образом, вероятность нахождения персонала в бункере во время работы по причине рассеянности сведена к минимуму. К названным мерам следует добавить использование индивидуального нагрудного дозиметра. Также для большей безопасности перед помещением со стороны входа выставляется знак «Осторожно, радиация» и ведется постоянное видеонаблюдение за помещением.

## **5.2 Экологическая безопасность**

Вопрос об охране экологического состояния Земли в последние годы поднимается все активнее. Увеличение содержания углекислого газа в атмосфере, истощение озонового слоя и прочие загрязнения природы приводят к тому, что в природе изменяются привычные для данного периода условия обитания. Электроника и линейки не несут в себе большой экологической угрозы. Материалы, с которыми проводятся опыты, а именно: алюминий, сталь, железо, цемент, древесина, вода, плексиглас – в последствие не утилизируются, а остаются для вторичного использования. Часть из них остается как основа для дальнейшего исследования, часть перерабатывается для последующего использования в других отраслях.

Согласно [62], в случае возникновения аварии должны быть приняты практические меры для восстановления контроля над источником излучения и сведения к минимуму доз облучения, количества облученных лиц, радиоактивного загрязнения окружающей среды. При радиационной аварии или обнаружении радиоактивного загрязнения ограничение облучения осуществляется защитными мероприятиями, применимыми, как правило, к окружающей среде и (или) к человеку. Так как досмотровый комплекс является источником искусственно создаваемого излучения, для предотвращения аварийных ситуаций предусмотрено 3 ступени быстрого ручного отключения установки, после которого излучение мгновенно прекращается и опасность экологического загрязнения и вредных воздействий на человека исчезает.

### **5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Безопасность в чрезвычайных ситуациях нормируется ГОСТ Р 22.0.01-94 и ГОСТ Р 22.0.07-95 [60, 61]. Вероятными чрезвычайными ситуациями, которые могут возникнуть при проведении данного научного исследования, являются:

- разрушение зданий и/или сооружений;
- пожары;

#### **5.3.1 Разрушение зданий и/или сооружений**

Разрушение зданий и сооружений может быть следствием взрыва лабораторного оборудования по причине его неисправности, либо по причине отсутствия контроля за техническим состоянием конструкции. Первые признаки разрушения здания – это трещины, которые начинают проявляться в результате механического воздействия, вибрации оборудования и т.д.

При малейших признаках обрушения необходимо укрыться в местах, где маловероятно поражение обломками (дверные проемы, углы). Движение в

полуразрушенном здании очень опасно, так как его разрушение может продолжиться. В связи с этим необходимо привлечь к себе внимание спасателей криками и ждать помощи. Запрещается возвращаться в разрушенное строение за имуществом. Безопасное расстояние от рушащегося здания – расстояние, равное его высоте.

### **5.3.2 Пожарная безопасность**

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

- наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному).
- позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112.
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## **5.4 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

### **5.4.1 Организационные мероприятия**

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом. Проверка знаний правил техники безопасности проводится начальником лаборатории после обучения на рабочем месте. Проверяемый заносится в специальный журнал и отмечается после проверки знаний техники безопасности. Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

Для организации безопасной работы с рентгеновской установкой выделяют 4 принципа:

- уменьшение мощности источников до минимальных величин («защита количеством»);



- сокращение времени работы с источниками («защита временем»);
- увеличение расстояния от источников до работающих («защита расстоянием»);
- экранирование источников излучения материалами, поглощающими ионизирующее излучение («защита экранами»).

«Защита количеством» подразумевает под собой уменьшение мощности бетатрона для того, чтобы доза, полученная в результате работы, не превышала норм. Для реализации данного типа защиты, помимо ПО, в пультовой комнате установлен специальный пульт, который позволяет снижать до минимума уровень излучения. «Защита временем» основывается на тех же закономерностях, что и «защита количеством». Сокращая срок работы с комплексом, можно в значительной степени уменьшить дозы облучения работников лаборатории. Так как бетатрон МИБ-9 нагревается при долгом использовании, необходимо следить за его температурными параметрами во время работы. При перегреве сотрудники лаборатории отключают установку, тем самым получая «защиту временем». «Защита расстоянием» подразумевает собой работу на максимальном удалении от источника излучения. Поглощенная доза обратно пропорциональна расстоянию, поэтому этот фактор очень важен. В лаборатории с досмотровым комплексом пультовая комната находится на удалении от бетатрона, и в стороне от основного пучка излучения. «Защита экранами» – перекрытие основного пучка излучения материалами, которые будут поглощать часть излучения. Для изготовления экранов применяют различные материалы, а их толщина определяется мощностью излучения. Пультовая имеет стены со слоем свинца и большой толщиной бетона, а также свинцовую дверь, которая закрывается на время работы бетатрона. Свинец является одним из лучших экранов для поглощения излучения.

### 5.4.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства.

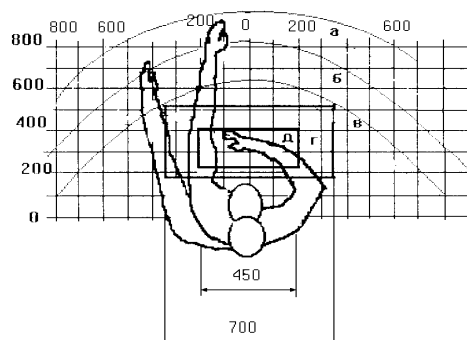


Рисунок 5.1 - Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а - зона максимальной досягаемости рук; б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в - зона легкой досягаемости ладони; г - оптимальное пространство для грубой ручной работы; д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей персонального компьютера размещается в зоне а (в центре); клавиатура - в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) - литература и документация, необходимая при работе; в шкафу для хранения - литература, которая не используется постоянно, но нужна при возникновении внештатных ситуаций.

## **Заключение**

Приведённые в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют сделать заключение о возможности измерения плотности материалов высокоэнергетическим рентгеновским методом с систематической погрешностью  $0,01 \text{ г/см}^3$ . Метод применим для испытаний крупногабаритных объектов контроля с переменной толщиной. Показано, что наблюдаемое смещение теоретических и экспериментальных зависимостей лучевой толщины объекта контроля от массовой толщины обусловлено недостаточностью коллимации источника высокоэнергетического рентгеновского излучения.

## Список публикаций студента

1) V Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность» г. Томск, НИ ТПУ.

Тема: «X-Ray radiography systems with identification of substances of control objects and their fragments by dual-method energy».

2) VI Всероссийская конференция "Ресурсоэффективным технологиям - энергию и энтузиазм молодых", г. Томск, НИ ТПУ.

Тема: «Рентгеновские досмотровые комплексы с функцией идентификации веществ объектов контроля и их фрагментов методом дуальных энергий». *Диплом I степени.*

3) 3-я Всероссийская научно-практическая конференция «Sibtest 2015» с международным участием, г. Горно-Алтайск.

4) IV Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», г. Томск, НИ ТПУ.

Тема: «Экспериментальные исследования возможности распознавания материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий для малых доз облучения».

5) Виртуальные и интеллектуальные системы, ВИС-2015, г. Барнаул, АлтГТУ.

Тема: «Высокоэнергетический малодозовый метод распознавания материалов».

6) VI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», г. Томск, НИ ТПУ.

Тема: «Оценка возможности измерения плотности материалов высокоэнергетическим методом дуальных энергий».

7) Тема «Особенности рентгеновской абсорбционной плотнометрии

Публикации (в т.ч. Scopus):

- 1) Osipov S. P. , Chakhlov S. V. , Osipov O. S. , Badjin S. S. , Abashkin A. D. Features of X-ray Absorption Densitometry of Large-size Objects with Variable Thickness // Journal of Physics: Conference Series. - 2016 - Vol. 671, Article number 012043. - p. 1-7
- 2) Abashkin A. D., Osipov S. P., Chakhlov S. V., Shteyn A. M. Experimental research of high-energy capabilities of material recognition by dual-energy method for the low-dose radiation // «Key Engineering Materials» Applied Mechanics and Materials

## Список использованных источников

1. Воробьев В. А., Горшков В. А., Шеломанов А. Е. Гамма-плотнометрия. // М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 144 с.
2. Кивилис С. С. Плотномеры. – М.: Энергия, 1980. – 279 с.
3. Бирюков Б. В., Данилов М. А., Кивилис С. С. Испытательные расходомерные установки. М.: Энергия, 1976.
4. Тхоржевский В. П. Автоматический анализ газов и жидкостей на химических предприятиях. М.: Химия, 1976.
5. Черкасов И. И. Начала грунтоведения Луны. М.: Наука, 1971.
6. Нестерехин Ю. Е., Солоухин Р. И. Методы скоростных измерений в газодинамике и физике плазмы. М.: Наука, 1967.
7. Green E., Grimm M. J. Density by hydrostatic weighing. // Metrologia. – 1970. – vol. 6. – № 4. – pp. 142 – 149.
8. Гаузнер С. И., Кивилис С. С., Осокина А. П., Павловский А. Н. Измерение массы, объема и плотности. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 586 с.
9. Глыбин И. П. Автоматические плотномеры и концентратомеры в пищевой промышленности. – М.: Пищевая пром-сть, – 1975. – 182 с.
10. Кивилис С. С. Промышленные плотномеры. – В кн.: Метрология и измерительная техника // ВИНТИ АН СССР. – М.: Итоги науки и техники, – 1975. – т. 3. – с. 285 – 313.
11. Методы и средства измерения плотности веществ в потоке // Приборы и системы управления, – 1975. – № 12, с. 14 – 30.
12. Методы и средства измерения плотности веществ в потоке // Приборы и системы управления, – 1976. – № 9, с. 27 – 35.
13. Методы и средства измерения плотности веществ в потоке // Приборы и системы управления, – 1976. – № 10, с. 17 – 25.
14. Маловичко В. А., Анисеев В. А., Ткаченко М. Ф. Использование эффекта присоединенной массы для измерения плотности растворов. // Известия Томск. политех. ин-та, – 1970. – вып. 184. – с. 44 – 47.

15. Фельдблюм П. Л., Хмельницкая Е. А. Анализ виброчастотного метода измерения плотности // Труды ВНИИКАНЕФТЕГАЗ, – 1968. – вып. 2. – с. 18 – 26.
16. Носов В. А. Проектирование ультразвуковой измерительной аппаратуры. М.: Машиностроение, – 1972.
17. Бражников Н. И. Ультразвуковые методы измерения плотности вещества // Приборы и системы управления, – 1976. – № 10. – с. 17 – 21.
18. Емельянов В. А. Полевая радиометрия влажности и плотности почвогрунтов. М.: Атомиздат, – 1970. – 333 с.
19. Лейпунский О. И., Новожилов Б. В., Сахаров В. И. Распространение гамма-квантов в веществе. – М.: Физматгиз, – 1960. – 208 с.
20. Ключев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В. И др. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В. В. Ключева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, – 2003. – 656 с.
21. Горшков В. А. Особенности двухэнергетической рентгеновской плотнометрии многокомпонентных объектов // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 10. – с. 25 – 30.
22. Способ двухэнергетической делительно – разностной маммографии. Пат. РФ № 2495623 / Горшков В. А., Назиров Р. Р., Родин В. Г. и др. // Изобретения. Полезные модели. – 2013. – № 29.
23. Method for dual – energy mammography. WO/2013/136150 (PCT) [RU] / Gorshkov V. A., Nazirov R. R., Rodin V. G. et al. // 19.09.2013. URL: <http://patentscope.wipo.int/search/en/WO2013136150>.
24. Горшков В. А., Рожкова Н. И., Прокопенко С. П. Визуализация микрокальцинатов на основе выпуклой комбинации плотности и эффективного атомного номера. // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 11. – с. 26 – 30.
25. Горшков В. А., Рожкова Н. И., Прокопенко С. П. Визуализация распределения эффективного атомного номера в маммографии. // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 11. – с. 33 – 36.
26. Рожкова Н. И., Горшков В. А., Прокопенко С. П. Цифровая

маммологическая клиника. Современные технологии визуализации / под ред. Рожковой Н. И., Горшкова В. А. М.: Спец. Изд-во мед. книг, – 2013. – 160 с.

27. Lewin J. M., Isaacs P. K., Vance V., Larke F. J. Dual – energy contrast – enhanced digital subtraction mammography: feasibility // Radiology. – 2003. – V. 229. – N. 1. – p. 261 – 268.

28. Блохин Е. О., Паршин И. А., Шурушкин А. В. и др. Рентгеновские комплексы на основе регистрации трансмиссионного и обратно рассеянного излучения // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 12. – с. 4 – 7.

29. Torikoshi, Ohno M., Endo Y. et al. Measurment of electron density and effective atomic number using dual – energy X – Ray CT // Nuclear Science Symposium Conference Record. IEEE. – 2014. – V. 6. – p. 3764 – 3768.

30. Pietrobelli A., Formica C., Wang Z., Heymsfield S. B. Dual – energy X – Ray absorptiometry body composition model: review of fhysical concepts // Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab. 271. – 1996. – E941 – E951.

31. Артемьев Б. В., Буклей А. А. Радиационный контроль. М.: ИД «Спектр», – 2011. – 192 с.

32. Heaven, T.J., White, S.L., Gauntt, D.M., Weems, R.A., Litaker, M.S. Density measurements of dentin by dual-energy radiography // Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology. – 2010. – Vol. 109. – No. 4. – pp. 604–614.

33. Горшков В.А. Особенности рентгеновской плотнометрии в условиях вариации химического состава объекта // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 10. – С. 25–30.

34. Zavialkin, F.M., Kvasnitsa, M.S., Osipov, S.P. Estimating the performance of a differential counting method of measuring material thickness // Soviet Journal of Nondestructive Testing. – 1985. – Vol. 21. – No. 4. – pp. 275–279.

35. Zav'yalkin F. M., Osipov S. P. Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions //Atomic Energy. – 1985. – V. 59. – № 4. – P. 842-846.

36. Hirayama H. Lecture Note on Photon interactions and Cross Sections //



The International Conference on the Monte Carlo 2000, Advanced Monte Carlo on Radiation Physics. Lisbon Portugal. – 2000. – 21 P.

37. Lightman A. P., Zdziarski A. A. Pair production and Compton scattering in compact sources and comparison to observations of active galactic nuclei //The Astrophysical Journal. – 1987. – V. 319. – P. 643-661.

38. Nedavnii O. I., Osipov S. P. Approximate energy spectrum of a high-intensity bremsstrahlung source derived from attenuation curve by method of moments //Russian journal of nondestructive testing. – 2001. – V. 37. – № 9. – P. 667-671.

39. Orlić I. et al. Parametrization of the total photon mass attenuation coefficients for photon energies between 100 eV and 1000 MeV //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1999. – V. 150. – № 1. – P. 40-45.

40. Rao D. V., Seltzer S. M., Bergstrom Jr P. M. Compton scattering cross-sections for individual subshells for a few elements of biological interest in the energy region 5keV–10MeV //Radiation Physics and Chemistry. – 2004. – V. 70. – № 4. – P. 479-489.

41. Hubbell J. H. Review and history of photon cross section calculations //Physics in Medicine and Biology. – 2006. – V. 51. – № 13. – P. R1-R22.

42. Nedavnii O. I., Osipov S. P., Sidulenko O. A. Computational aspects of dual energy digital X-ray photography //Russian journal of nondestructive testing. – 2002. – V. 38. – № 3. – P. 170-175.

43. Rebuffel V., Dinten J. M. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits //Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. – 2007. – V. 49. – № 10. – P. 589-594.

44. Nedavnii I. O., Osipov S. P. Use of the Two-Energy X-ray Method for Detection and Classification of Inclusions in an Inspected Object with Fluctuating Parameters //Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2005. – V. 41. – № 4. – P. 260-265.

45. Kak A. C. Computerized tomography with X-ray, emission, and

ultrasound sources //Proceedings of the IEEE. – 1979. – V. 67. – №. 9. – С. 1245-1272.

46. Nedavnii O. I., Osipov S. P. Approximation of the Relationships of the Integral and Differential Attenuation Factors of Continuous X-Rays (Bremsstrahlung) to the Absorbing Filter Thickness //Russian Journal of Nondestructive Testing. – 1994. – V. 30. – № 9. – P. 716-719.

47. Gil A., Segura J., Temme N. M. Numerical methods for special functions. – Society for Industrial and Applied Mathematics. – 2007.

48. Helland I. S. On the structure of partial least squares regression //Communications in statistics-Simulation and Computation. – 1988. – V. 17. – № 2. – P. 581-607.

49. Spang III H. A. A review of minimization techniques for nonlinear functions //SIAM review. – 1962. – V. 4. – № 4. – P. 343-365.

50. Ресурс удаленного доступа. 127-групповая библиотека данных о взаимодействии ГАММА-КВАНТОВ С ВЕЩЕСТВОМ.  
<http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/groupkon.php> – ГИЦ РФ – ФЭИ.

51. Chadwick, M.B., Obložinský, P., Herman, M. etc. ENDF/B–VII. 0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology // Nuclear data sheets. – 2006, Vol. 107, No. 12, pp. 2931–3060.

52. Kulakov A. S. Simulation of interactions of electrons and positrons with matter in MCU-PD code // Physics of Atomic Nuclei. – 2011. – Vol. 74. – No. 13. – pp. 1819–1830.

53. Zav'yalkin, F.M., Osipov, S.P. Calculation of the scattering function of a multichannel scintillation detector used to record high-energy photon radiation // Soviet Atomic Energy. – 1986. – Vol. 60. – No. 2. – pp. 186–188.

54. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.

55. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного излучения».

56. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.

57. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».
58. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
59. СП 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009),.
60. ГОСТ Р 22.0.01-94 Безопасность в ЧС. Основные положения.
61. ГОСТ Р 22.0.07-95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.
62. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 13.07.2015) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"
63. Козак, Т.Н. Радиационные плотномеры, регистрирующие обратно рассеянное гамма-излучение // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – Випуск 5. – С. 11–15.
64. Недавний, О.И., Недавний, И.О., Осипов, С.П. Выбор расстояния от источника излучения до объекта контроля для гамма-абсорбционного плотномера в геометрии расходящегося пучка // Дефектоскопия. – 2000. – № 7. – С. 76–81.
65. Osipov, S., Chakhlov, S., Osipov, O., Badin, S., Abashkin, A. Features of X-ray absorption densitometry of large-size objects with variable thickness // Journal of Physics: Conference Series. –2016. – Vol. 671. – No. paper 012043. – 6 p.
66. Завьялкин, Ф.М., Осипов, С.П. Выбор размеров сцинтилляционных детекторов и энергии коррекции при использовании метода дуальной энергии в вычислительной томографии // Дефектоскопия. – 1985. – № 9. – С. 71–76.
67. Чахлов, С.В., Осипов, С.П. Высокоэнергетический метод дуальных энергий для идентификации веществ объектов контроля // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 9. – С. 9–17.



Продолжение таблицы А

№	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ									
				09.15	10.15	11.15	12.15	01.16	02.16	03.16	04.16	05.16	06.16
7	Цикл натурных экспериментов по оценке плотности методом дуальных энергий	Абашкин А.Д. Штейн А.М.	61										
8	Цикл вычислительных экспериментов по оценке влияния различных физических факторов на точность оценки плотности методом дуальных энергий	Осипов С.П. Абашкин А.Д. Штейн А.М.	61										
9	Разработка алгоритма обработки информации в методе дуальных энергий, позволяющего оценить плотность объекта контроля	Осипов С.П.	61										
10	Проверка эффективности алгоритма обработки информации в методе дуальных энергий, позволяющего оценить плотность объекта контроля	Абашкин А.Д. Штейн А.М. Осипов С.П.	60										

Продолжение таблицы А

№	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ									
				09.15	10.15	11.15	12.15	01.16	02.16	03.16	04.16	05.16	06.16
11	Формулировка рекомендаций по выбору основных параметров рентгеновского абсорбционного измерителя плотности методом дуальных энергий	Осипов С.П. Штейн А.М.	61										
12	Оформление диссертации, подготовка доклада для защиты	Абашкин А.Д.	61										

Обозначения таблицы 9:

Абашкин А.Д. -  , Штейн А.М. -  , Осипов С.П. - 

Приложение 2. Таблица Б – Реестр рисков по проекту

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения	Условия наступления
1	Закупка образцов из некачественных материалов	Недостоверность полученных данных при исследованиях	3	5	Высокий	Более тщательный входной контроль материалов	Некачественный отбор материалов
2	Внеплановое отключение электроэнергии	Несохранение данных исследования	1	3	Средний	Автосохранение получаемых данных	Чрезвычайная ситуация
3	Неисправность оборудования	Невозможность проведения исследований	4	5	Высокий	Наличие деталей для проведения ремонта оборудования	Несвоевременный мониторинг оборудования
4	Отсутствие финансирования	Срыв графика исследований	1	4	Высокий	Наличия запаса необходимых материалов	Прекращение международного контракта
5	Заболевание исполнителя	Срыв графика исследований	3	4	Высокий	Планирование работ с запасом времени по графику	Своевременная профилактика заболеваний
6	Отсутствие информативности в полученных данных	Срыв графика исследований	2	5	Высокий	Возможность использования полученных данных в других разработках	Некорректно поставленные задачи исследования

## Приложение 3

Раздел

Введение, Обзор литературы, Раздел 2.5, Раздел 3.1

---

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Абашкин А.Д.		

Консультант кафедры \_\_\_\_\_ ФМПК \_\_\_\_\_:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Устюжанина А.К.	К.т.н., доцент		

Консультант – лингвист кафедры \_\_\_\_\_ (аббревиатура кафедры) \_\_\_\_\_:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Устюжанина А.К.	К.т.н., доцент		



## Introduction

One of the most important characteristics of a material is a density. Currently, there is a surge of interest of scientists and industrialists to the problems associated to the measurement of density. This is the result of the significant progress in the production of materials for various purposes, as well as the expanded production of a variety of complex shapes and large sizes. As usual consumers are interested in, not the information on the average density over the whole volume of the test object, but on the density distribution of the fragments of the object of control. The above leads to the relevance of the theme of dissertation research. Radiation methods based on registration transmitted or scattered radiation is widely used for density measurement. Gamma rays or X-ray machines are the most common sources of ionizing radiation. A limitation to assess the density of materials of large objects with variable thickness is the maximum energy of the x-ray sources and gamma radiation sources. From mass-produced gamma-ray sources with high specific activity should be noted radionuclide Co-60 with an average energy of 1.25 MeV. Currently, there is a progress in increasing the maximum energy of X-ray machines, which reached the level of 850 keV. Despite the mentioned progress, X-ray machines with a maximum energy greater than 450 keV are rare in industrial applications, which is due to their extremely high cost primarily. An alternative to mentioned above X-ray equipment are the unique sources of high-energy X-ray radiation - small impulse betatrons produced in Tomsk Polytechnic University by small series. A distinctive feature of the betatron is a high maximum energy of X-ray radiation - 2 MeV to 9 MeV and pretty high stability of the X-ray parameters from one pulse to the other pulse. Another important factor in favor to the TPU betatron X-ray sources choice stands very high penetrating power. The documentation for betatrons MIB-7.5, MIB-9 is set at the level of the penetrating power of 240-300 mm by steel. It should be noted that the results of unique experiments conducted on TPU inspection systems, significantly expanded the area of the possible use of betatron, as was achieved penetration ability of 400-430 mm by steel. There is another factor contributing to the solution of the

problem stated above. This factor is associated with a marked progress in the development of high-performance linear and matrix X-ray detectors.

The subject of dissertation research - X-ray absorption density measurement techniques.

The object of research - the laws of formation and algorithms for processing digital radiometric signals applied to the evaluation of the density of materials of large-sized objects of complex shapes.

The purpose of research - to develop selection methods and evaluation parameters and characteristics of the complex X-ray absorption density meter.

To achieve this goal is supposed to solve the following problems associated with the development of:

- Mathematical model of the X-ray absorption density meter of the material in relation to the control of complex objects;
- High-precision approximation of the mass attenuation coefficient of X-ray suppressant by barrier thickness;
- Information processing algorithm for multi-channel measuring densitometer for large-sized objects.

Research methods. To achieve the objectives methods of mathematical analysis, mathematical and natural modeling, statistical processing of the experimental results were used.

Scientific novelty:

- A mathematical model of the X-ray absorption density meter of the material in relation to the control of complex objects.
- A high-precision approximation of the mass attenuation coefficient of X-ray suppressant by barrier thickness proposed.
- A data processing algorithm for multi-channel measuring densitometer of large-sized objects.
- Experimental evaluation of the limiting possibilities of X-ray absorption density measurement method applied to test large-sized objects of complex shape had done.

The practical significance of the work consists in the fact that the results obtained in the dissertation research results will allow to develop the X-ray absorption measuring densitometer of materials for large objects with complex shapes.

Implementation of the results. The results of the research implemented in the mathematical model, the meter equation and algorithms selection and evaluation of parameters and characteristics of X-ray absorption measuring densitometer for large objects with complex shapes.

On presentation are:

- Mathematical model of the X-ray absorption density meter of the material in relation to the control of complex objects.

- High-precision approximation of the mass attenuation coefficient of X-ray suppressant by barrier thickness.

- Information processing algorithm for multi-channel measuring densitometer for large-sized objects.

- The results of the experimental evaluation of the limiting density measurement capabilities by high-energy digital radiography.

## **Literature review**

Density takes a special place among a large number of indicators of quality of materials because it defines such characteristics as durability, lifetime, impermeability, frost resistance and others [1]. In industrial and civil engineering the major controlled parameter is the consolidation coefficient. Change of this coefficient for 1% causes change of durability to 8 – 10% already at coefficient of consolidation 0,95 – 0,96. The solution of some construction engineering and geological engineering tasks is impossible without knowledge of density of material. Density measurements were used in various industries.

Density is one of the main physical quantities that describes the properties of solids. Its dimension plays a very important role in the conduct of research, which are taking place in different fields of science and technology. The density measurement is an important part in monitoring the quality of products and processes. Devices to measure the density are an important element of integrated automation in many industries, such as chemical, metal manufacture, petroleum and others [2].

Nowadays big attention is given to the expansion of industrial production of existing types of densitometers. Even more funds and resources allocated to research and development of new density measurement principles and the establishment of a constructive new devices for measuring the density of objects. Increasing the range of industries and processes in which the consumption of the substances involved in the implementation process is evaluated by weight was a prerequisite for the growth of the role and value of the density measurement. In such methods, the mass flow rate is determined by multiplying together the results of separate measurements of density. Also in the organization with various systems of quantitative accounting of the substances (in which the measured parameter submitted by mass) density measurement plays an important role, because it is not always possible to determine the weight of an object or body by direct weighing. In such cases, we can determine its weight by the results of measurement of density and volume of the object.

In [3] and [4] shown that the density measurement plays an important role in creating a variety of measurement tools (instrumentation and metrology industry), which are associated with the analysis of the composition of matter and its properties. Also, the determination of the matter's density is held in high importance in the developing fields of science, which are relatively new. It includes such studies as space [5], the plasma research [6], so you can add a variety of research related to the solution of environmental problems in this group.

There are various methods for measuring the density of solids - the most popular of them are considered further.

Principle of hydrostatic weighing. This principle is based on use of the law of Archimedes. As the pushing-out force operating on the body shipped in liquid is proportional to liquid density means having weighed a body in liquid it is possible to find the mass of liquid in this body, and, therefore, its density. To measure density of a solid body by this method, the body is weighed at first in air, and then in liquid of known density. By results of these measurements it is possible to judge the weight and volume of a body that is a basis for measurement of density [7]. To determine body density at a certain temperature, it is necessary to heat liquid in which weighing is made. It is possible to weigh a body in liquid of any temperature differing from density set for definition (for example, at a room temperature that is very convenient), but in this case the coefficient of thermal expansion of the studied substance that would allow to consider corresponding change of volume has to be known [8].

Measurement of density by pycnometer is the most exact, but at the same time is a time-consuming method. The pycnometer represents a vessel of a certain volume and form. This method is based on weighing of substance, which occupies known volume in the pycnometer. The pycnometric method has a number of advantages over a method of hydrostatic weighing. Main advantages are: a small error of measurements that is caused by application of high-precision laboratory scales without any additional devices, which reduce sensitivity; the free surface in the pycnometer has the small area that practically excludes liquid evaporation, and also reduces the absorption of moisture from the air; operations of liquid temperature

control in the pycnometer and weighing the object are carried out separately from each other. This method also has the weaknesses: it is difficult to maintain constant temperature in all volume of liquid; weighing big weight decrease the sensitivity of scales. The pycnometric method is more preferred than hydrostatic weighing when labor content is justified and there is a precautionsness required [8]. At a pycnometric method of measurement of density of solids carry out 3 weighings [2]: the examinee of a body in air; the pycnometer filled with liquid of known density; the densimeter filled with the same liquid and with the body shipped in it. The liquid is poured in the last two experiments need to be at the same temperature and achieve the same level.

Instruments for density measurements in the laboratory were considered above. Laboratory devices designed to perform high-precision analysis, research and operations quantifying substances in storage and release. There is need to conduct continuous or periodic measurements of the density of matter directly to the work progress in the implementation of a large number of production processes. Appliances designed for such measurements, called the automatic densitometer, or just densitometer in short [9]. Densitometers divided to showing information instrument and self-registering instruments, and both devices can be installed either near the controlled object, or at a distance from him. The use of densitometers in combination with other devices can also automatically adjust the density of the material in the line [10], if we are talking about liquid bodies.

Densitometers can be divided into the following groups by the principle of their work [11 - 14]:

- 1) float, based on a fluid or gas density and the buoyancy, which acts on the float which is immersed in a controlled substance;
- 2) Weighting, based on the continuous weighing of a certain amount of liquid;
- 3) Hydrostatic, based on the measurement of pressure column of constant height filled with the liquid (gas);
- 4) Hydrodynamic, based on the characteristic curve which includes density of the substance and the dynamic pressure of the flow;

5) Radioisotope, where attenuation of the radiation intensity of the radioactive isotopes is used when passing through the controlled substance;

6) The vibration, the effect of which is based on the relationship between the parameters of elastic vibrations imparted to the vessel with a controlled substance or a body placed in the substance, and the density of the substance;

7) Ultrasonic, based on the measurement of the propagation speed or intensity of ultrasonic waves in the material;

8) Dynamic, that use the relationship between the gas density and the rate of its outflow through the opening (or dynamic pressure).

Vibrating densitometers. This type of densitometers include devices whose operation is based on the relationship between the density of matter and the parameters of elastic vibrations imparted to the body [14]. There are two groups of vibrating densitometers [15]: amplitude densitometers and frequency densitometers. The amplitude densitometers are measuring a resonator amplitude at its constant resonant frequency. Since the amplitude of the oscillation of the resonator is determined by a number of factors, not just its parameters, the metrological characteristics of the amplitude of density is limited. Frequency densitometers measured frequency of the resonator (which along with the drive and feedback forms by electromechanical generator), which is functionally related to the density of matter. Measured frequency of the resonator depends on the parameters and does not depend on the amplitude. In consequence, the frequency densitometers have higher metrological characteristics in comparison with the amplitude ones. They also surpass their ease of processing the received output signal. The main advantages, which led to the spread of the frequency of density, are high precision, reliability and a high level of sensitivity. Also there includes the possibility of direct conversion of the desired density in the frequency output signal, and the possibility of using this type of density at high pressures for gases and liquids. However, the frequency densitometers have drawbacks, such as to influence the temperature and pressure parameters of the resonator, the need for special measures to compensate non-linearity of the scale.

Ultrasonic densitometers. The use of ultrasonic waves to measure the density of the materials is a widespread and popular industry densitometers. By ultrasonic vibrations include such variations, the frequency of which is beyond the upper limit of the audible to the human ear sounds. Conventionally, such a limit of 20 kHz. Ultrasonic vibrations in a material environment creates any oscillating body, which is in contact with this environment. Medium density determined by measuring the propagation velocity of ultrasonic waves in the body, thus taking the adiabatic compressibility constant coefficient [16]. Ultrasonic density measurement method has high sensitivity, almost without inertia and avoids contact with the test medium (liquid and gas facilities) [17]. The downside of this method are its low productivity and time-consuming when working with large objects.

Currently, the various branches of science, technology and production are widely used radiation densitometers. Conventionally, all the radiation densitometers can be divided into 2 groups [18]: first - densitometers registering radiation passing through the test material, and the second - densitometers, recording the scattered radiation in the material. Density of the last group are the most promising, as they allow to measure density with one-way access to the test object. Traditional methods of developing of gamma-densitometers based on an a single choice of process measurement circuit with the further optimization of one or two of its parameters, which resulted in only a slight performance improvement of developed instruments on the one hand, and the lack of sufficient justification of technological measurement circuit - on the other. These deficiencies, common to almost all known densitometers, affect the result accuracy and operational characteristics of these devices, as they prevent the further development of methods and means of radiation densitometry.

In the development of gamma - densitometry can distinguish 4 stages [1]:

- 1) Linking the different characteristics interact with gamma radiation to measure the geometry of the material, density and chemical composition of the material;



2) Extensive experimental studies of communication of energy and angular characteristics of interacted gamma - radiation with the test parameters of the environment;

3) Changing to the theoretical research methods that provide greater accuracy and reliability of the results;

4) Creating a CAD gamma - densitometry focused on extensive research on mathematical models with access to the technological parameters of the gamma densitometers.

Modern gamma - densitometry is on the 4th stage of its development.

Gamma - radiation is a short-less than  $10^{-13}$  meters; electromagnetic oscillations that occur in nuclear transformations, deceleration of charged particle environment and annihilation. The wavelengths of the range shows the properties of the corpuscular fluctuations are pronounced. Proceeding from this gamma - radiation is regarded as a flux of neutral particles - photons moving at the speed of light and having energy. Species interactions are largely determined by energy - the most important characteristic of elementary particles. 10 MeV is usually taken as the upper limit, which is less than the energy of photons emitted by the majority of natural and artificial radioactive isotopes [19]. The lower limit is less definite. For primary photons with energies below 20 keV is predominantly absorbed. However, consideration must be given to the energy up to 10 keV, and less for the X-rays which have undergone multiple scattering. If we neglect the interaction effects, which make little contribution to the attenuation of the radiation, the mechanism of distribution of gamma - particles in the substance can be described as follows. Interacting with electrons in most cases, the number of X-rays experiencing a collision, because of which the movement direction changes quanta energy is decreased, or they can be absorbed during any collision.

There are three versions of the radioactive method of density measurement: methods of radiographic material narrow and wide beams and the method of scattered gamma - radiation, called gamma - gamma - method. The method of radiographic narrow beam based on registration only primary gamma - radiation passed through a

layer of the material. Influence of scattered gamma - radiation on measurement accuracy is eliminated by means of collimation detection and evaluation using an electronic circuit of the spectral composition of the radiation detected by the detector. Technological scheme of the measurement laboratory embodiment of the method shown in Figure 1.

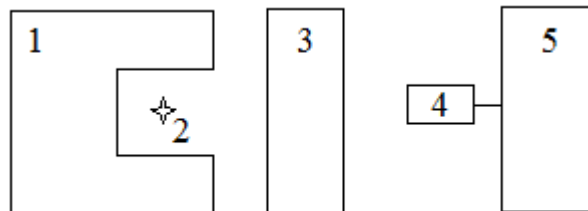


Figure 1. Flow diagram of the density measurement radiographic materials by a narrow beam of: 1 - a collimator; 2 - source of gamma - radiation; 3 - the sample of the material; 4 - gamma – radiation detector; 5 - recording equipment.

Errors in determining material density measurement associated with the inspected material layer thickness, with an intensity of transmitted and primary gamma - radiation, and with the instrumental errors emerged due to time and temperature instability of electronic equipment.

A distinctive feature of the method of the wide beam narrow beam technique - measuring the impact on the results recorded by the detector of scattered gamma - radiation, which greatly complicates the theory of this method. The basis for this method is the measurement circuit technology in which the radiation source is located at a depth of 40 - 50 cm, and the detector detecting apparatus on the surface of the medium under investigation.

For depth measurements most promising method is the method of scattered gamma - radiation. In this method, the source and detector of gamma - radiation are placed on the surface of the material, wherein between the source and the detector has a direct protection against gamma - radiation [1].

Traditional radiation densitometry allows high accuracy to control the objects density which variation is only due to the technological features of the densification

process at a constant chemical composition [20]. However, there is a significant error when evaluating the density variations in the chemical composition (effective atomic number). [21] This problem exists in the mining, nuclear power, metallurgy and other industries. Particular importance is the evaluation of density in terms of impermanence effective atomic number in medicine [22-27]. With the development of modern means of customs control will also increase the relevance of imaging the distribution of effective atomic number [28]. The most common method of estimating the density variation in a chemical composition of dual-energy method of X-ray densitometry, which is based on detection of the transmitted radiation fractions at two different energies of photons [29, 30]. If objects are liquid, which are uniform in density, based on the dual-energy method monoenergetic sources allows to obtain its unbiased estimates, the objects for density variations along the vector of propagation of the radiation, the method is characterized by the systematic error [31]. Dual-energy method (MDE) allows you to simultaneously evaluate the density and effective atomic number of the item's material [32, 33]. The method [34], which is called a spectrometer method, based on the registration of the energy spectrum. Spectrometric method minimizes the impact analyzed the effect on the parameter estimation precision of X-ray absorption method and obtain, as in the MDE, additional information about the object. The spectrometer implementation countable X-ray recording mode is characterized by a low productivity in comparison with other recording methods. The method analyzed the effect of compensation, based on the pre-calibration, it is the most productive and easy to implement.

## **Experimental Studies**

### **Experimental evaluation of $Y(\rho H)$ for steel objects**

Experimental evaluation of  $Y(\rho H)$  dependence was conducted on a set of digital radiography with a source of high-energy X-ray radiation - small-size pulsed betatron IIB-4/9 (Institute of Non-Destructive Testing, TPU). Detector specifications are listed in the calculated example. A narrow beam of X-rays formed by slit collimator. Collimator slit width  $d = 5$  mm. The thickness of the collimator  $D = 300$  mm. The distance from the radiation source to the test object about 3000 mm. Dependencies  $Y(\rho H)$  were evaluated for maximum energy X-ray radiation  $E_0 = 4,5$ , and 9 MeV. The objects of steel density  $\rho = 7,85$  g / cm<sup>3</sup> were investigated. Figure 2.3 shows the experimental dependence  $Y(\rho H)$  for steel fragments of the test object and the X-ray maximum energy  $E_0 = 4,5$ , and 9 MeV. The choice of material fragments of the test object was due to the high quality rolled steel. The experimental results are supplemented by dependence  $Y(\rho H)$  on the Figure 2.3 below, calculated using the formula (2.8). From the analysis of the results shown in Figure 2.3, we can conclude understated values of the radial thickness of the steel pieces in the experiment. The following hypothesis suggested for an explanation of this output: one of the most likely reasons for this underestimation is the lack of collimation of the X-ray source.

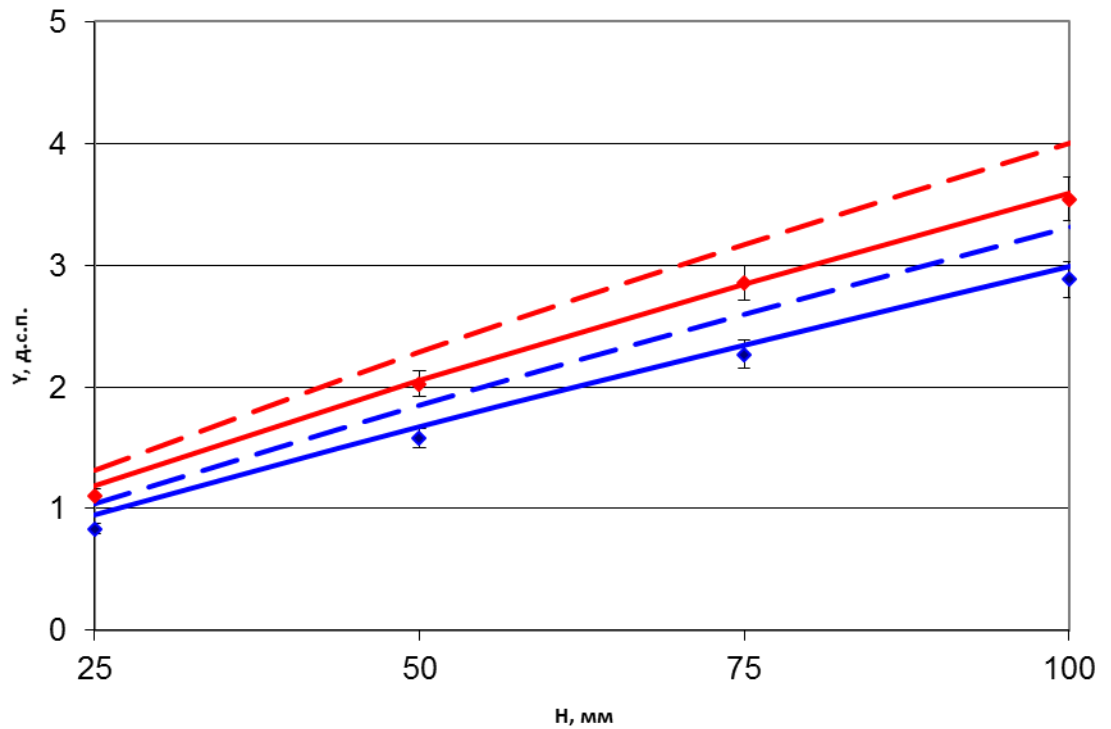


Figure 2.3 – Typical  $Y(\rho H)$  characteristic curve for steel

$E_0=4,5$  MeV - - - calculated results;  $\blacklozenge$  – experiment;

— calculated results with the scattered radiation correlation;

$E_0=9$  MeВ - - - calculated results;  $\blacklozenge$  – experiment;

— calculated results with the scattered radiation correlation

A series of calculations was performed to confirm the hypothesis shown above. Energy coefficient of targeted X-ray accumulation  $B_e$  by Monte-Carlo factor was calculated for geometric circuit measurements for high-energy digital radiography complex located at Institute of Non-Destructive Testing, TPU. Initial data for calculation  $B_e$ :  $F=4200$  mm;  $D=400$  mm;  $d=5$  mm;  $A=200$  mm;  $B=200$  mm;  $H$  – changeable parameter, vary by 25 to 125 mm;  $a=5$  mm;  $b=6$  mm;  $h=45$  mm. Accounting for scattering leads to the transformation of the calculated dependencies  $Y(\rho H)$  into  $Y^*(\rho H)$ . An expression that describes the specified transformation is shown below:

$$Y^*(\rho H) = Y(\rho H) - \ln B_e(\rho H). \quad (2.13)$$

Figure 2.3 shows the  $Y^*(\rho H)$  dependence, derived from initial computational dependencies using the (2.13) formula. Comparison  $Y^*(\rho H)$  charts and experimental

values of the radial thickness of the fragments of the test object confirmed the validity of the hypothesis about the nature of the results of calculations and experiments offset.

### **The experimental equation of X-ray transmission density meter**

The contribution of photons scattered in the object of control, leads to a signal level shift from the model signals level. The model signal described as a hypothetical signal received for perfect collimation of the source and the detector, i.e. the contribution of scattering to the integrated signal at the output of radiometric detector equals zero. It changes the physical nature of the value  $Y$ , but that does not mean the inability to use the densitometer generalized equation in conjunction with the approximation (2.13) for  $k = 3$ .

Table 2.3 summarizes the coefficients of the third degree polynomial, approximating the experimental dependence  $Y(\rho H)$  for fragments of the test object made of steel for maximum high-energy X-ray radiation  $E_0 = 4,5$  and 9 MeV. The table also shows the values of the marginal error of approximation  $\Delta_p$ .

By the analysis of the data given in Table 2.3 can be concluded the applicability of the third degree polynomial (four-parameter method) for the practical evaluating of material density of the controlled object by the X-ray absorption method.

Table 2.3 – The experimental values of the coefficients  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , and  $\delta$  for steel made objects,  $\rho=7,85 \text{ g / sm}^3$ ,  $k=3$

$E_0, \text{ MeV}$	Coefficients				
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$\Delta_p$
4,5	–5,707	25,57	–3,216	0,764	0,0008
9	–3,184	28,35	–1,694	0,5581	0,0086

## **Assessing the possibility of measuring materials density with high energy method of dual energy**

### **General information about the dual energy method**

The problem of determining the density of different materials is typical for many areas of science, industry, construction industry, customs control. To assess the radiation density of widely used methods based on measurement of the attenuation and scattering of gamma or X-rays [1, 63-64]. The use of gamma-ray sources is limited by a low specific activity, energy of the radiation range and a considerable size of the radiator. X-ray sources are free from these disadvantages. Nowadays an actual problem is the development of high-precision densitometers for large objects control with variable thickness. Additionally, these days flexibility is required to the density meters, which consists in independent quality measuring of the effective atomic number of the object control's material. Report of [33] shows a mathematical model of multi-channel high-energy absorption X-ray measuring densitometer for similar objects with variable thickness. The model includes the interaction of high energy radiation with the substance, converting analog signals to digital signals, and includes a densitometer equation and necessary constraints and guidance. Comparison of the results of theoretical and experimental research on high-energy digital radiography complex, located at TPU, with a source of radiation betatron MIB-4.5 / 9 showed a significant shift of density estimates [33], due to the scattered radiation into the controlled object. Changing the chemical composition of the controlled object material leads to a displacement density estimation [65]. Noted displacement is caused by tightening of the X-ray beam behind the object of control, and this tightening depends on the thickness of the test object and the density and effective atomic number of the material object of control. The thicker object and the higher atomic number causes bigger displacement. Dual-energy method (DEM) is used to compensate this effect in the X-ray computer tomography [66]. Recently, DEM has found application in the customs control, this method allows to identify the

controlled object materials. The high-energy implementation of a method for identifying materials by DEM is described in detail in [67]. In the DEM the results of signal processing are two measured parameters, which are results of two max X-rays energies. One parameter shown dependent on the thickness of the mass, and the second also shows the effective atomic number object of control. Density measurement with minimum impact of effective atomic number of the controlled object material based on this opportunity. The literature is not enough discussed measuring the density of materials based on high energy DEM.